



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UniCEUB
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

FERNANDO DE MELO MACIEL

CIRCUITO PARA REGULAGEM DE POTÊNCIA UTILIZANDO TIRISTOR TRIAC E
MICROCONTROLADOR 8051

Orientador: Prof. José Julimá Bezerra Junior

Brasília

novembro, 2010

FERNANDO DE MELO MACIEL

CIRCUITO PARA REGULAGEM DE POTÊNCIA UTILIZANDO TIRISTOR TRIAC E
MICROCONTROLADOR 8051

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília
(UniCEUB) como pré-requisito
para a obtenção de Certificado de
Conclusão de Curso de Engenharia
de Computação.

Orientador: Prof. José Julimá
Bezerra Junior

Brasília

novembro, 2010

NOME DO ALUNO

TÍTULO DO TRABALHO

Subtítulo (se houver)

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília
(UniCEUB) como pré-requisito
para a obtenção de Certificado de
Conclusão de Curso de Engenharia
de Computação.
Orientador: Prof. José Julimá
Bezerra Júnior

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação,
e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas -
FATECS.

Prof. Abiezer Amarilia Fernandez
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. José Julimá Bezerra Júnior
Orientador

Prof. Vera Lúcia Farini Alves Duarte
Mestre em Matemática

Prof. Cléber da Silva Pinheiro
Doutor em Física

Prof. João Marcos Souza Costa
Especialista em Matemática

Agradecimentos

Agradeço a todos que possibilitaram a realização deste projeto.

Agradeço a Deus, por não me deixar perder as forças quando tudo parecia perdido.

Agradeço aos meus pais, Denilse e Mariosan, pelo carinho, compreensão, apoio, sucos e biscoitos.

Agradeço aos meus irmãos pelo suporte, apoio e paciência.

Agradeço a alguém pelo apoio e compreensão.

Agradeço ao professor Julimá pela orientação e cobrança.

Agradeço ao Gil pelas idéias e orientações.

Agradeço pelo material fornecido.

Agradeço ao fórum pelos momentos de descontração.

Agradeço a um almoço aleatório de sexta-feira.

Agradeço também a uma pasta perdida.

E agradeço a todos que merecem e que não foram mencionados.

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SUMÁRIO..... | 5 |
| LISTA DE FIGURAS | 6 |
| LISTA DE EQUAÇÕES | 8 |
| LISTA DE QUADROS | 9 |
| RESUMO | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1. Motivação | 12 |
| 1.2. Objetivo | 12 |
| 1.3. Visão Geral do Projeto | 13 |
| 1.4. ESCOPO..... | 14 |
| CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TECNOLÓGICO..... | 16 |
| 2.1. Controle de Potência..... | 16 |
| 2.2. TRIAC | 20 |
| 2.2.1. Dispositivo Semicondutor | 21 |
| 2.2.2. Tiristor | 22 |
| 2.2.3. SCR (<i>Silicon Controlled Rectifier</i> – Retificador Controlado de Silício)..... | 22 |
| 2.2.4. TRIAC TIC246D..... | 25 |
| 2.3. Fotoacoplador MOC3020..... | 26 |
| 2.4. Microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU..... | 28 |
| 2.5. Comparador analógico..... | 31 |
| CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO..... | 33 |
| 3.1 Visão geral..... | 33 |
| 3.2. Circuito de controle de potência..... | 34 |
| 3.2.1 Segmento de regulador de tensão | 36 |
| 3.2.2 Segmento de disparo do triac | 39 |
| 3.2.3 Segmento do comparador analógico..... | 40 |
| 3.2.4 Segmento de sincronismo e reset do microcontrolador..... | 43 |
| 3.2.5 Segmento de exibição de dados..... | 44 |
| 3.2.6 Segmento de entrada de dados..... | 45 |
| 3.2.7 Segmento do microcontrolador | 46 |
| 3.3 Método de controle | 47 |
| 3.4 Software de controle | 50 |
| 3.5 Testes | 61 |
| CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO..... | 69 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 71 |
| APÊNDICE I – CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE DE CONTROLE RANGE 10%..... | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. 1 - Esquema geral do projeto | 13 |
| Figura 2. 1 - Senóide de tensão com disparos no zero | 18 |
| Figura 2. 2 - Disparos do TRIAC em tempos diferentes de zero | 18 |
| Figura 2. 3 – Senóide de tensão em momento diferente de zero | 19 |
| Figura 2. 4 - Simbologia do TRIAC | 20 |
| Figura 2. 5 - Equivalente do TRIAC com 2 SCR's em antiparalelo | 21 |
| Figura 2. 6 - Estrutura interna de um SCR | 23 |
| Figura 2. 7 - SCR comparado a dois transistores | 23 |
| Figura 2. 8 - Transistores PNP e NPN | 24 |
| Figura 2. 9 - Equivalente do TRIAC em SCR | 25 |
| Figura 2. 10 - Fotoacoplador de 6 pinos | 27 |
| Figura 2. 11 - Pinagem interna do MOC3020 | 27 |
| Figura 2. 12 - Pinagem do microcontrolador AT89C4051-24PU | 30 |
| Figura 2. 13 - Amplificador operacional | 31 |
| Figura 3. 1 - Esquema do circuito | 33 |
| Figura 3. 2 - Diagrama de blocos do projeto | 34 |
| Figura 3. 3 - Circuito completo de controle de potência | 35 |
| Figura 3. 4 - Segmento regulador de tensão | 37 |
| Figura 3. 5 - Onda de tensão retificada pulsante | 38 |
| Figura 3. 6 - Onda regulada | 38 |
| Figura 3. 7 - Sinal regulado | 39 |
| Figura 3. 8 - Segmento de disparo do TRIAC | 39 |
| Figura 3. 9 - Segmento do comparador analógico | 41 |
| Figura 3. 10 - Diagrama de blocos do comparador analógico | 42 |
| Figura 3. 11 - Saída do comparador analógico | 42 |
| Figura 3. 12 - Sinal de saída do comparador analógico | 43 |
| Figura 3. 13 - Segmento de sincronismo do microcontrolador | 43 |
| Figura 3. 14 - Circuito de reset do microcontrolador | 44 |
| Figura 3. 15 - Segmento de exibição de dados | 45 |
| Figura 3. 16 - Segmento de entrada de dados | 46 |
| Figura 3. 17 - Pinagem do microcontrolador | 47 |
| Figura 3. 18 - Período da senóide de tensão | 48 |
| Figura 3. 19 - Diagrama de blocos do software | 51 |
| Figura 3. 20 - Cabeçalho do programa | 54 |
| Figura 3. 21 - Rotinas de configuração do display | 54 |
| Figura 3. 22 - Conversão BCD e ASCII | 55 |
| Figura 3. 23 - Rotinas de exibição de mensagens | 56 |
| Figura 3. 24 - Rotinas do dimer | 57 |
| Figura 3. 25 - Rotinas de delay | 57 |
| Figura 3. 26 - Controle de luminosidade | 58 |
| Figura 3. 27 - Tabela de atribuição de valores | 59 |
| Figura 3. 28 - Kernel principal | 59 |
| Figura 3. 29 - Programa compilado | 60 |
| Figura 3. 30 - Arquivo gravado em <i>buffer</i> | 60 |
| Figura 3. 31 - Tela de gravação do microcontrolador | 61 |

| | |
|------------------------------------------------|----|
| Figura 3. 32 - Circuito desligado | 61 |
| Figura 3. 33 - Mensagem de apresentação | 62 |
| Figura 3. 34 - Mensagem de feedback..... | 62 |
| Figura 3. 35 - Potência aplicada de 100% | 63 |
| Figura 3. 36 - Senóide chaveada em 10% | 63 |
| Figura 3. 37 - Senóide chaveada em 30% | 64 |
| Figura 3. 38 - Senóide chaveada em 50% | 64 |
| Figura 3. 39 - Senóide chaveada em 70% | 65 |
| Figura 3. 40 - Senóide chaveada em 100% | 65 |
| Figura 3. 41 - Saída do transformador..... | 66 |
| Figura 3. 42 - Pulsos TRIAC para 10% | 66 |
| Figura 3. 43 - Pulsos TRIAC para 30% | 67 |
| Figura 3. 44 - Pulsos TRIAC para 50% | 67 |
| Figura 3. 45 - Pulsos TRIAC para 70% | 68 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Equação 2.1 – Potência instantânea..... | 14 |
| Equação 2.2 – Potência média..... | 15 |
| Equação 2.3 - Percentual de potência para 75% da tensão eficaz | 17 |
| Equação 3.1 – Cálculo da frequência | 45 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 3.1 – Valores calculados e medidos com range de 10% | 48 |
| Quadro 3.2 – Valores de R5 nos endereços de memória de R1 | 50 |

RESUMO

Este projeto consiste em controlar a potência da carga de um circuito resistivo por meio de rotinas de programação em assembly, gravadas em um microcontrolador ATMEL AT89C4051 e disparos no gatilho do dispositivo de chaveamento de tensão, o TRIAC TIC246D. A carga resistiva é representada por uma lâmpada. O TRIAC é um dispositivo eletrônico que tem a finalidade de variar a tensão eficaz aplicada à carga mediante a aplicação de pulsos no *gate* desse dispositivo. A aplicação dos pulsos é controlada pelo microcontrolador. Este recebe informações da rede de energia elétrica e calcula o momento exato do disparo para uma dada potência requerida pelo usuário. A variação da potência pode ser constatada pela variação da tensão eficaz e, conseqüentemente, pela alteração no brilho da lâmpada.

Palavras chave: potência, circuito resistivo, assembly, microcontrolador AT89C4051, TRIAC TIC246D.

ABSTRACT

This project is based in controlling the power under the load of a resistive circuit using assembly programming routines, recorded on a microcontroller ATMEL AT89C4051 that triggers the switching tension device, TRIAC TIC246D. The resistive load is represented by a lamp. TRIAC is an electronic device which is intended to vary the effective voltage applied on the load by shooting pulses at the gate of this device. The pulses are controlled by a microcontroller. It receives information from the power grid and calculates the exact time of triggering for a specific power required by user. The variation of power can be verified controlling the effective voltage and, consequently, changing de lamp brightness.

Keywords: power, resistive circuit, assembly, microcontroller AT89C4051, TRIAC TIC246D.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este projeto consiste em desenvolver um circuito de controle de potência em uma carga resistiva, controlado por um microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU, da família 8051, e por um TRIAC TIC246D. A variação da potência da carga é representada pela alteração na luminosidade gerada por uma lâmpada de 60 watts. Com este circuito, pode-se controlar a potência variando a tensão aplicada à carga.

1.1. Motivação

A motivação deste projeto surgiu a partir da idéia de se controlar a aplicação medida de tensões em cargas resistivas, como em um *dimmer*. Como resultado deste projeto específico é apresentado, na prática, um *dimmer* eletrônico.

1.2. Objetivo

O objetivo é controlar a potência de uma carga resistiva. A carga escolhida foi uma lâmpada incandescente de 60 watts, em razão da sua característica resistiva e do seu brilho variar de acordo com a tensão aplicada. Dessa forma, a variação de potência da carga é percebida de modo visual.

1.3. Visão Geral do Projeto

Este projeto é composto basicamente por três segmentos: uma fonte de alimentação, um circuito de controle de potência e um circuito de potência, todos gerenciados pelo microcontrolador. Por meio de *push-buttons* e um *display* de cristal líquido, é definido o percentual de potência necessário para que a lâmpada de 60 watts tenha o brilho desejado, exemplificando assim a potência aplicada à carga.

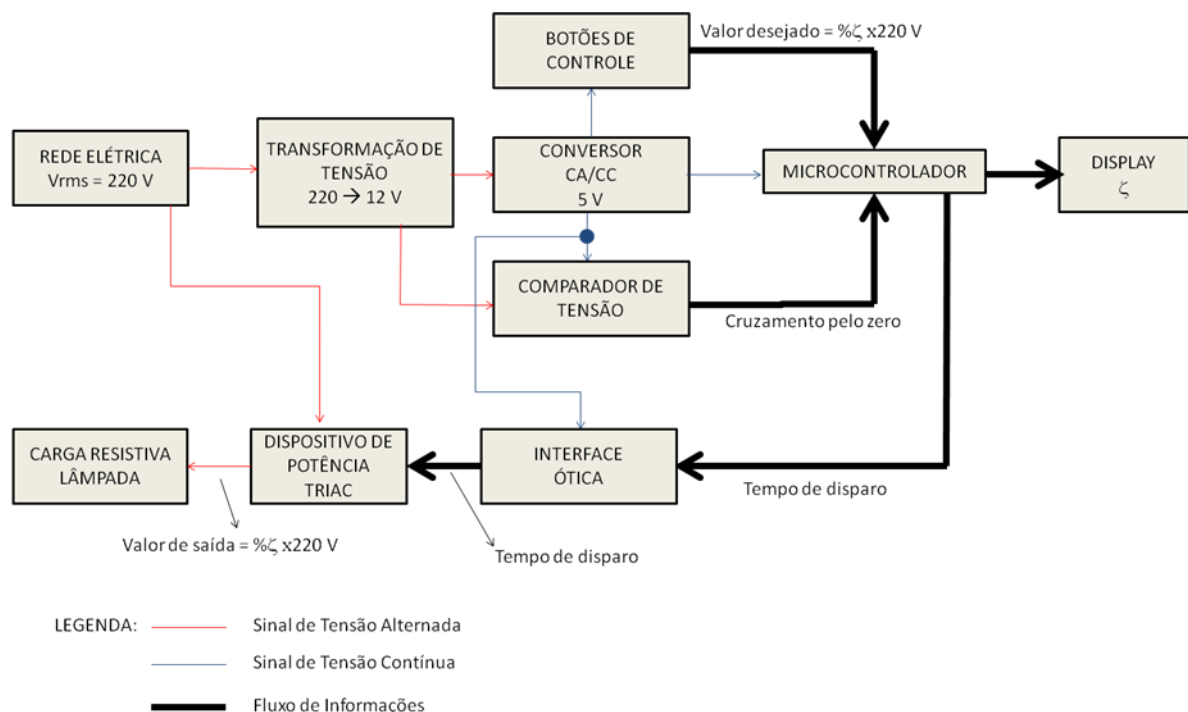


Figura 1.1 - Esquema geral do projeto

Conforme ilustrado na Figura 1.1, o circuito é ligado a uma rede de alimentação de 220 volts, de corrente alternada. Por meio de um transformador, a tensão da rede é transformada em 12 volts. Amostras desta tensão são utilizadas para o cálculo do tempo de disparo do TRIAC, com base no período da tensão alternada. Por meio da análise destas amostras de tensão, o microcontrolador executa rotinas de programação e utiliza os dados fornecidos pelo usuário para calcular o tempo que o TRIAC necessita para controlar a tensão

aplicada sobre a carga. Para alimentar os dispositivos do circuito, utiliza-se uma fonte de alimentação de 5 volts.

Outros dispositivos fazem a intermediação entre os citados acima. Para o controle da potência aplicada à carga, é utilizado um TRIAC TIC246D, um fotoacoplador MOC3020, para ligação entre o TRIAC e o microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU. Entre o microcontrolador e o transformador de 200 miliampères existe um amplificador operacional LM324N para transformar o sinal senoidal proveniente da rede elétrica em uma onda quadrada, lida por uma porta do microcontrolador. A função do comparador é informar ao microcontrolador o momento que a onda senoidal passa pelo valor zero. A carga utilizada é uma lâmpada de 60 watts incandescente comum. Para a alimentação do circuito e dispositivos eletrônicos empregados na construção do projeto, tem-se o transformador, que modifica a tensão da rede de 220 volts em uma tensão de 12 volts e uma fonte de alimentação de 5 volts, alimentando os dispositivos eletricamente.

O usuário poderá variar a potência ao alterar o valor eficaz da tensão. Para isso, ajusta-se, por intermédio dos botões, o valor percentual de *zeta* ($\% \zeta$), mostrado na figura 1.1. Este valor de variação possui um *range* de 10%.

1.4. ESCOPO

O capítulo 2 aborda o referencial tecnológico do projeto, ou seja, os conceitos e definições mais importantes, tais como o funcionamento dos componentes eletrônicos utilizados, o acoplamento entre esses componentes, os conceitos relevantes de eletrônica, entre outros assuntos pertinentes ao entendimento do projeto.

O capítulo 3 refere-se ao desenvolvimento do projeto. Neste capítulo é demonstrado o modo como o projeto foi implementado. Também são descritos os testes realizados, resultados obtidos e as rotinas de programação desenvolvidas.

O capítulo 4 é o capítulo de conclusão. Nele é mostrado o resultado do projeto, problemas enfrentados e superados e sugestões de projetos futuros.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TECNOLÓGICO

A proposta deste projeto é realizar o controle da potência aplicada a uma carga determinada, uma lâmpada de 60 watts, por meio dos disparos de um tiristor TRIAC, controlados por um microcontrolador da família 8051. Para tanto, deve-se primeiramente conhecer o funcionamento dos componentes mais importantes do circuito.

Neste capítulo aborda-se a teoria relacionada a este projeto. O item 2.1 refere-se à forma como será controlada a potência aplicada à lâmpada, o item 2.2 ao TRIAC e aos conceitos fundamentais para o entendimento de seu funcionamento, o item 2.3 ao dispositivo fotoacoplador, o item 2.4 ao microcontrolador e à utilização de suas portas e pinos e o item 2.5 ao comparador analógico interno ao amplificador operacional.

2.1. Controle de Potência

O objetivo deste projeto é determinar a potência média P aplicada a uma carga resistiva específica. Em outras palavras, determinar quanto de energia será dispendida nesta carga gerando trabalho, ou seja, a luminosidade da lâmpada empregada como carga resistiva. Em termos numéricos, a potência instantânea $P(t)$ é calculada multiplicando-se o valor da corrente instantânea $i(t)$ pelo valor da tensão instantânea $v(t)$, como mostra a equação 2.1 [8]. Se a corrente estiver em ampères e a tensão em volts, o valor da potência será dado em *Watts*.

$$P(t) = i(t) \times v(t)$$

Equação 2. 1 – Potência instantânea

O valor da potência média de um circuito resistivo é calculado pelo quociente do valor de tensão eficaz elevado a 2º potência pela resistência da carga, conforme mostra a equação 2.2 [9]. R é a resistência da carga, ou seja, a resistência do filamento metálico da lâmpada.

$$P = V_{rms}^2 / R$$

Equação 2. 2 - Potência média

A luminosidade gerada pela lâmpada provém da potência gerada pela tensão aplicada ao circuito. Variando-se a tensão sobre a carga resistiva, varia-se conseqüentemente o valor da potência. Desta forma, para se controlar a potência aplicada à lâmpada, é realizado o controle do valor de tensão, baseado no período de sua senóide.

Em uma rede de corrente alternada (CA), a tensão da rede assume dois sinais em seu ciclo de 360°. Meio ciclo de corrente será positivo, enquanto o outro meio ciclo será negativo [9]. O TRIAC, que é um dispositivo de chaveamento detalhado em tópicos seguintes, tem como característica principal a possibilidade de disparar ou chavear a tensão independentemente do sinal do meio ciclo.

Para se chavear toda a tensão disponível, considera-se o primeiro disparo do TRIAC exatamente sobre o ponto zero da senóide de tensão, que é o momento em que toca a linha horizontal, conforme ilustra a figura 2.1. Ao se aplicar a tensão no gatilho do TRIAC, caso seja alcançado o valor mínimo de corrente (corrente de retenção), este entrará em modo de condução. Contudo, apenas conduzirá enquanto a corrente que passa pelo TRIAC estiver acima do valor de corrente de manutenção. Como a senóide passará pelo ponto zero a cada meio ciclo de tensão, a corrente do TRIAC cairá abaixo deste limite mínimo de corrente de manutenção, sendo necessário novamente o disparo do TRIAC [9]. A Figura 2.1 ilustra a senóide de tensão com os disparos no momento em que toca a linha horizontal. Caso este novo disparo venha a ocorrer no momento em que a senóide de tensão passar pelo zero, a

tensão liberada será equivalente a outro meio ciclo, ou meio período, fornecendo assim a potência máxima para a lâmpada.

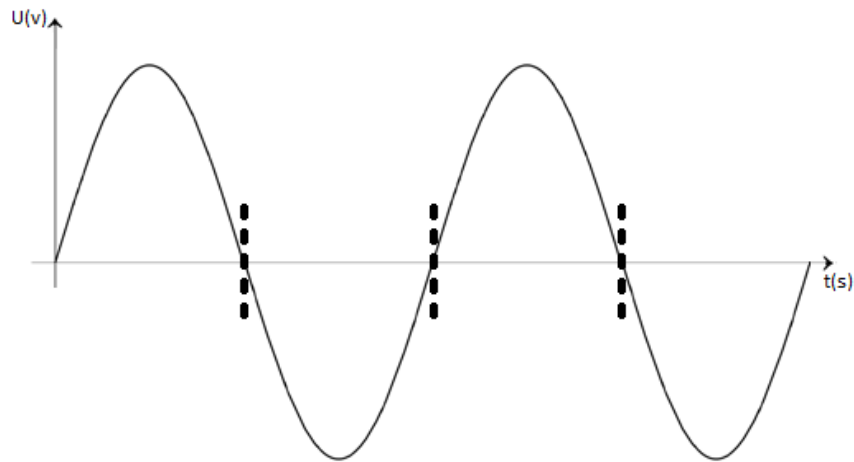


Figura 2. 1 - Senóide de tensão com disparos no zero

Caso estes disparos venham a ocorrer em qualquer outro ponto além do ponto zero da senóide, como mostra a Figura 2.2, a tensão liberada não mais será a tensão máxima, e sim uma tensão inversamente proporcional ao tempo de atraso do disparo do TRIAC [9].

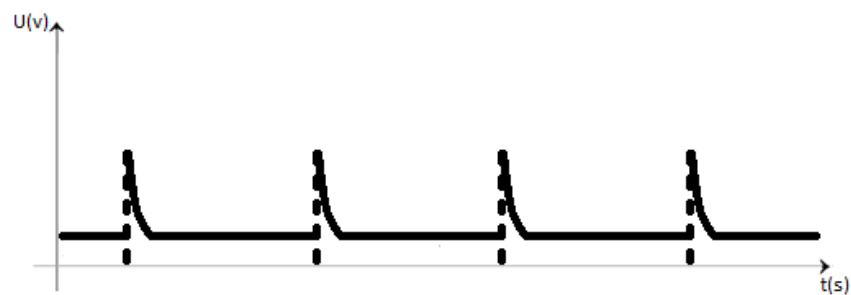


Figura 2. 2 - Disparos do TRIAC em tempos diferentes de zero

Por exemplo, se após passar pelo zero o gatilho do TRIAC for disparado decorridos 25% do tempo do meio período da senóide de tensão, então 75% da tensão eficaz máxima será aplicada à carga. Conseqüentemente, a lâmpada funcionará com 56% da potência máxima, como mostra a Equação 2.3.

$$P = (0,75V_{rms})^2 / R = 0,56V_{rms}^2 / R = 0,56P_{max}$$

Equação 2. 3 – Percentual de potência para 75% da tensão eficaz

Controlando estes tempos de disparo pode-se controlar a tensão aplicada à lâmpada, conforme pode ser visto na figura 2.3, que ilustra a senóide de tensão aplicada à carga em um momento de disparo do TRIAC diferente de zero. Caso o ponto de disparo seja, por exemplo, de 20%, um tempo igual a 80% do tempo de meio ciclo da senóide será aguardado para que o TRIAC chaveie a corrente alternada. Neste caso, têm-se a forma de onda presente na figura 2.3.

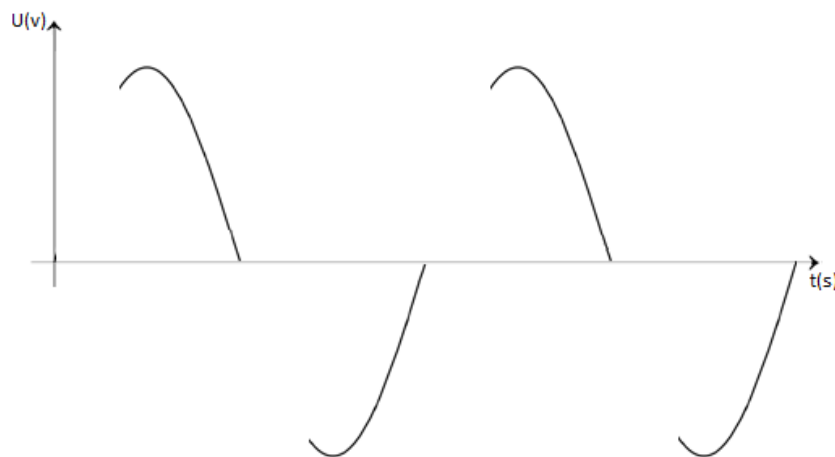


Figura 2. 3 - Senóide de tensão em momento diferente de zero

O disparo ideal, exatamente sobre o zero da senóide, não pode ser aplicado na prática, pois no ponto em que a tensão passa do seu valor positivo para seu valor negativo e em suas proximidades, a tensão do ânodo sobre o cátodo do dispositivo também é zero, não conduzindo corrente [9].

O objetivo deste projeto é realizar o controle dos disparos nos dois meio ciclos, positivo e negativo. Ao se realizar o controle do ponto onde a tensão tem valor próximo à zero, pode-se realizar os disparos do gatilho do dispositivo em todos os semi-ciclos. Isso é demonstrado no capítulo Desenvolvimento do Projeto.

2.2. TRIAC

O TRIAC, ou *TRiode for Alternating Current*, é um componente eletrônico semicondutor amplamente utilizado para realizar o controle da passagem de corrente em circuitos de corrente alternada devido à sua capacidade de condução nos dois sentidos, positivo e negativo. Isto significa que, independentemente da polarização percebida em seus terminais MT1 ou MT2, ele pode ser disparado com um pulso de tensão positiva ou negativa [9]. Metaforicamente, internamente ele é composto por dois dispositivos SCR (*Silicon Controlled Rectifier* – Retificador Controlado de Silício) ligados em antiparalelo, ou seja, um ao contrário do outro, com suas polaridades invertidas. Na Figura 2.4 é mostrada a simbologia mais usual para o TRIAC.

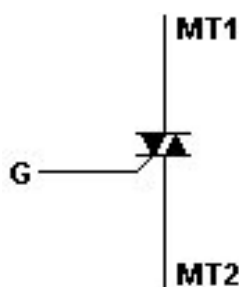


Figura 2. 4 - Simbologia do TRIAC

Por estarem ligados em antiparalelo, os SCR metaforicamente internos do TRIAC conduzirão a corrente em sentido positivo ou negativo. Cada SCR conduzirá em um dos sentidos. Por se tratar de um circuito que realiza o controle da potência por meio de corrente alternada, os ciclos de corrente serão sempre alternados. Por esta razão o TRIAC é empregado para o controle em circuitos de corrente alternada. Caso fosse empregado um SCR apenas para este controle, a corrente seria conduzida em 180°, ou seja, apenas em meio ciclo de tensão, sendo metade do período da senóide desconsiderada. A Figura 2.5 mostra o equivalente do TRIAC com dois SCR's ligados em antiparalelo.

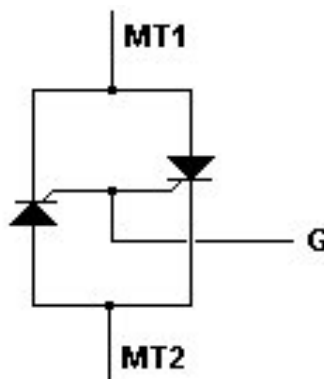


Figura 2. 5 - Equivalente do TRIAC com 2 SCRs em antiparalelo

O TRIAC possui em sua estrutura interna três terminais: MT1, MT2 e *Gate*. O primeiro é chamado de Terminal Principal 1, o segundo é chamado de Terminal Principal 2 e o terceiro chamado de Gatilho (*Gate*) do TRIAC. Para conduzir a corrente em qualquer sentido, deve ser aplicado um sinal elétrico no *gate* do TRIAC até que seja alcançado o valor de corrente de retenção, que é o menor valor instantâneo de corrente entre o ânodo e o cátodo para que o dispositivo entre em modo de condução. Após este disparo, a corrente que circula no TRIAC deverá ser sempre maior do que a corrente mínima necessária para que a condução não cesse, chamada de corrente de manutenção. Caso a corrente circulante seja menor que este valor, o TRIAC pára de conduzir. Estes valores de corrente são informados nas especificações do dispositivo.

2.2.1. Dispositivo Semicondutor

Semicondutores são sólidos cristalinos que à temperatura de zero kelvin se comportam como materiais isolantes, ou seja, não conduzem corrente elétrica por não terem elétrons livres ou lacunas existentes na camada de valência, que é a última camada de energia de um átomo [10].

À temperatura ambiente, um material não condutor pode, por meio da excitação de alguns dos seus elétrons da camada de valência, vir a conduzir corrente elétrica. Aos dispositivos construídos deste tipo de material se dá o nome de dispositivos semicondutores, já que não são tão eficientes quanto os condutores (dispositivos que sempre têm lacunas ou elétrons livres na camada de valência), e nem isolantes (dispositivos formados por materiais que precisam de uma energia muito grande para perder um elétron da camada de valência e conduzir eletricidade) [11].

2.2.2. Tiristor

Tiristores são dispositivos bi-estáveis que possuem três ou mais junções e que podem mudar de estado condutor para estado não-condutor quando a corrente ou tensão é alterada sobre o dispositivo. Basicamente são aplicados no chaveamento de corrente em circuitos de corrente alternada. Como exemplo de tiristores pode-se citar o SCR e o TRIAC, que é abordado neste projeto [10].

2.2.3. SCR (*Silicon Controlled Rectifier* – Retificador Controlado de Silício)

O SCR, ou retificador controlado de silício, é um dispositivo semicondutor formado por três junções de camadas de silício internas, PNPN, conforme mostra a Figura 2.6. Sua função é atuar como um dispositivo chaveador não-mecânico de corrente. Desta forma, a tensão aplicada a uma carga por meio de um SCR é controlada pela frequência que a chave é ligada ou desligada, podendo isso acontecer milhares de vezes por segundo, dependendo das especificações do dispositivo [9].

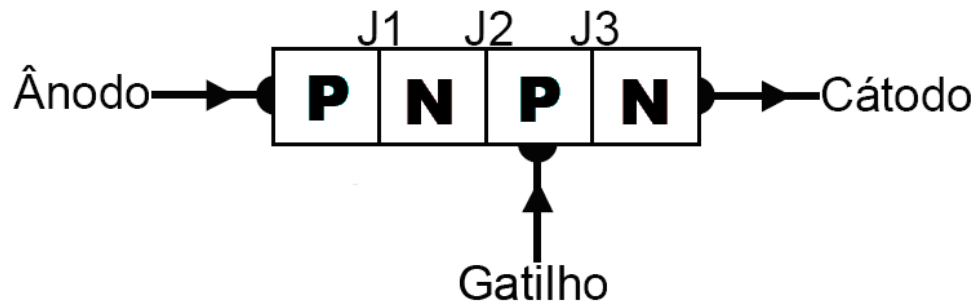


Figura 2. 6 - Estrutura interna de um SCR

A estrutura interna de um SCR é bem similar a de um diodo, porém sua funcionalidade pode ser mais bem explicada se comparada ao funcionamento de dois transistores, PNP e NPN, em conjunto. A figura 2.7 mostra o arranjo de dois transistores funcionalmente como um SCR.

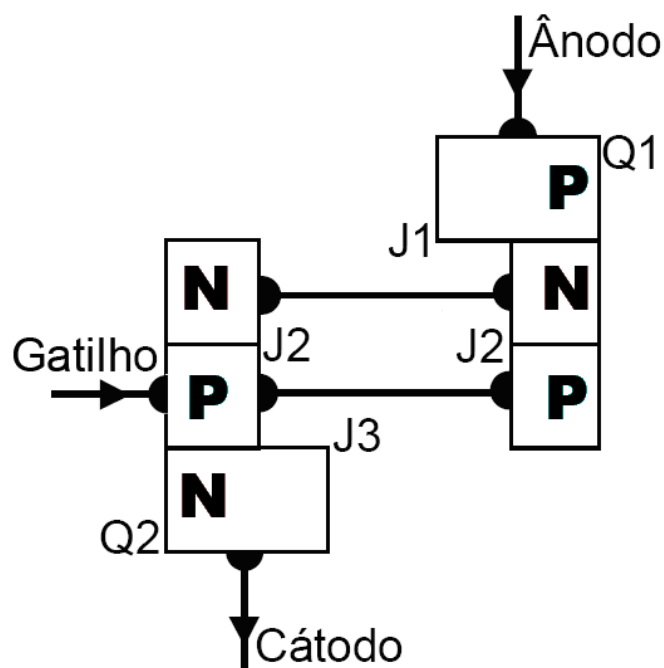


Figura 2. 7 - SCR comparado a dois transistores

Na Figura 2.8 é mostrado um transistor atuando como um SCR. Na parte superior é encontrado o ânodo. Na parte inferior nota-se o cátodo. O gatilho está na camada positiva do transistor NPN e Q1 e Q2 são os próprios transistores.

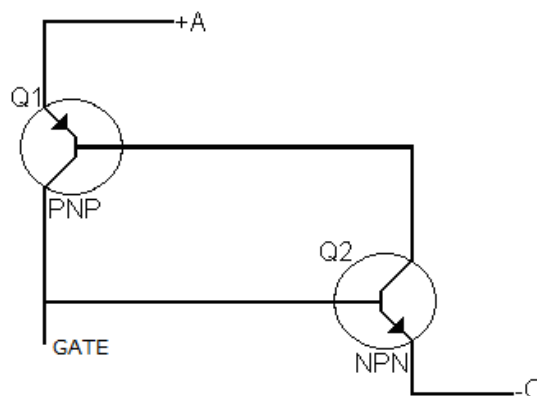


Figura 2. 8 - Transistores PNP e NPN

Para que o SCR seja disparado e comece a conduzir, deve existir um sinal de corrente no gatilho para o cátodo quando estiver polarizado diretamente, ou seja, quando a tensão no ânodo é maior que a tensão no cátodo. Esta corrente, normalmente, é um pulso aplicado a fim de efetuar este disparo. Se esta corrente aplicada no gatilho for suficiente para disparar o dispositivo, o SCR entrará em modo de condução. Para que esta condução se efetive, a corrente aplicada ao gatilho do SCR deve ser suficiente para que o dispositivo conduza uma corrente mínima, a corrente de retenção. Caso o disparo seja efetuado e seja também suficiente para gerar a corrente mínima para que o dispositivo possa conduzir corrente, esta deve permanecer maior do que a corrente de manutenção, que é o menor valor de corrente necessária para que as barreiras de potencial internas do dispositivo não se formem, impedindo assim a condução [9].

O SCR conduzirá enquanto existir corrente entre o ânodo e o cátodo, cortando este fluxo apenas se a corrente for praticamente nula ou se a tensão for zero em um determinado momento. Por este motivo é chamado de chave de retenção, pois uma vez em condução permanece neste estado até que a corrente seja menor que a corrente de manutenção. Quando polarizado reversamente, o SCR atua como um diodo, não permitindo a passagem de corrente mesmo se forem efetuados pulsos em seu gatilho.

Existe ainda outro meio de um SCR entrar em modo de condução. Se aplicada a chamada tensão de ruptura, ou tensão de *breakover*, o dispositivo passará a conduzir. Este tipo de condução pode danificar o dispositivo. Tensões muito próximas à tensão de *breakover* devem ser evitadas [9]. Esta tensão é informada pelo fabricante do SCR.

Em circuitos de corrente alternada, ao final de cada semi-ciclo de tensão o SCR será cortado, parando assim de conduzir, pois a corrente chegará a zero. Para que a condução não cesse, é necessário que disparos sejam efetuados no gatilho do SCR toda vez que a corrente ou tensão chegarem à zero, lembrando que o SCR conduzirá corrente apenas em meio ciclo de tensão.

2.2.4. TRIAC TIC246D

O TRIAC, como dito anteriormente, funciona como dois SCRs ligados, onde o ânodo do primeiro SCR é o cátodo do segundo, e o cátodo do primeiro é o ânodo do segundo. O gatilho de cada um dos SCR é comum ao gatilho do outro. Na Figura 2.9 é mostrado um exemplo de dois SCR ligados.

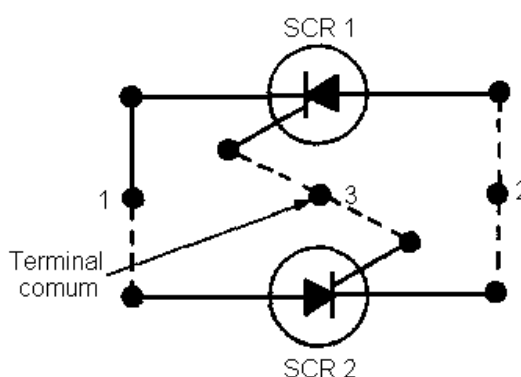


Figura 2. 9 - Equivalente do TRIAC em SCR

O TRIAC funciona exatamente da mesma forma que um SCR, porém conduzirá corrente nos dois sentidos, positivo e negativo. Isto se dá pelo fato de sua estrutura interna ser semelhante a dois SCRs ligados. Quando um estiver diretamente polarizado e apto a conduzir corrente, o outro estará reversamente polarizado, não permitindo a passagem de corrente, mesmo com disparos efetuados no gatilho do dispositivo. A cada passagem pelo zero da corrente alternada esta configuração se modifica, e cada SCR será polarizado de modo que o que estava diretamente polarizado ficará inversamente polarizado, e o que estava inversamente polarizado ficará diretamente polarizado e apto a conduzir corrente.

O TRIAC utilizado no circuito é um TRIAC TIC246D. Sua corrente de retenção é de 80 miliampères. Sua corrente de manutenção é de 40 miliampères. O valor que deve ser aplicado no gatilho para o disparo é de 50 miliampères ou 2 volts para corrente e tensão, respectivamente.

2.3. Fotoacoplador MOC3020

Um dispositivo fotoacoplador é um componente que tem em sua estrutura interna um LED (*light emitter diode* - diodo emissor de luz) e um fototriac, montados internamente a um circuito integrado (CI). Sua função é transmitir impulsos elétricos sem contato físico entre os componentes, por meio de emissão de luz.

Internamente funciona da seguinte forma: ao se aplicar uma tensão nos pinos do LED, este se acende e polariza a base do fototriac existente no CI. Desta forma, o fototriac conduz corrente pelo segundo circuito, que é isolado do primeiro.

No circuito deste projeto é utilizado um fotoacoplador MOC3020. Ele foi aplicado especificamente para proteger o microcontrolador de eventuais picos de tensão, podendo assim queimar o dispositivo. A Figura 2.10 mostra um fotoacoplador de seis pinos.

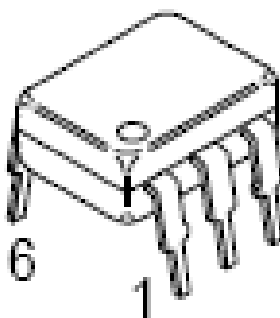


Figura 2. 10 - Fotoacoplador de 6 pinos

Conforme é observado na figura 2.11, o LED está com seus terminais alocados nos pinos um e dois, enquanto o fototriac tem seus terminais localizados nos pinos quatro e seis. Os pinos três e cinco não devem ser utilizados. A corrente necessária para se ativar o LED é de 15 miliampères.

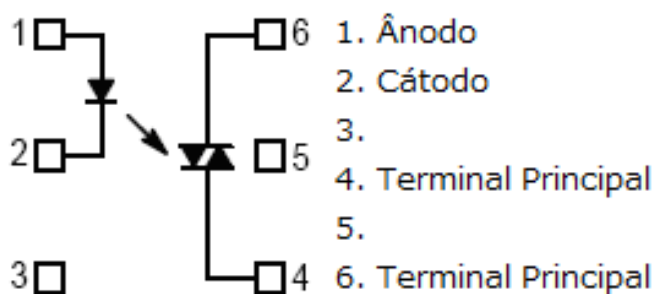


Figura 2. 11 - Pinagem interna do MOC3020

2.4. Microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU

Um microcontrolador é um pequeno dispositivo eletrônico programável para atender a tarefas específicas ou dedicadas. Geralmente são embutidos em outros produtos, para automação e controle de periféricos.

Os microcontroladores englobam diversas características dos microprocessadores, como componentes lógicos e aritméticos, porém têm componentes adicionais em sua estrutura, como processador, memória de programa e de dados, conversores analógicos e digitais, portas para recebimento e envio de dados, temporizadores (ou *timer*), funções de entrada e saída, dentre outros. Com todos estes componentes embutidos em um único circuito interno (CI) a confiabilidade aumenta, visto que a quantidade de componentes externos ao CI diminui [4], minimizando assim a influência de fatores externos nos componentes. Sua capacidade de armazenamento de memória é bastante reduzida se comparada aos computadores atuais, podendo ter memórias *Flash*, EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) ou RAM (*Random Access Memory*). Sua frequência de *clock* é da ordem de megahertz (MHz), sendo, desta forma, bem mais lentos que os microprocessadores atuais.

Uma vantagem dos microprocessadores é o baixo consumo de energia, visto que podem hibernar caso fiquem ociosos, ou até que algum evento requisite o processamento de alguma instrução. Porém, alguns microcontroladores já possuem esta funcionalidade, podendo entrar em modo de espera aguardando por um evento externo ou interrupção, tornando-os ideais em aplicações onde o baixo consumo de energia é crucial. Também são utilizados em projetos onde o superdimensionamento de um componente é um problema. Isto normalmente ocorre em projetos comerciais de larga escala, onde cada custo excedido (ou desperdício) é multiplicado por cada unidade fabricada do produto.

Todo microcontrolador é programável. Isto significa dizer que é adaptável para diversos fins. Cada vez que o dispositivo é ligado, o programa gravado em sua memória é executado. Como em um microprocessador, todas as instruções matemáticas e de lógica são executadas pela ULA (Unidade Lógica e Aritmética). Quanto maior e mais robusta for a ULA, mais rápido é seu processamento, maior é seu consumo de energia e mais calor é dissipado. Desta forma, deve ser determinado pelo fabricante do produto qual é a relação entre o custo e o benefício do microcontrolador e sua finalidade.

Existem diversas empresas fabricantes de microcontroladores. Cada um pode ser utilizado para fins específicos com arquiteturas internas diferenciadas, determinados por sua documentação, com vantagens e limitações. Entre eles encontram-se os microcontroladores fabricados pela empresa Atmel, um deles escolhido para este projeto. Mais especificamente, é utilizado para o controle do circuito um microcontrolador da família MSC-51, denominado AT89C4051-24PU, que nada mais é que uma versão de 20 pinos do microcontrolador 8051.

Este microcontrolador tem oito bits, o que significa que pode realizar operações de dados de oito bits de uma só vez. Segundo seu *datasheet*, é dotado de uma memória *flash* de quatro *kilobytes*, cento e vinte e oito *bytes* de memória RAM, quinze portas de entrada e saída de dados, dois temporizadores ou contadores de dezesseis bits, uma porta serial *full-duplex* e um comparador analógico interno. Seu modo de espera interrompe o funcionamento do processador enquanto ainda habilita a memória RAM, temporizadores e contadores e portas seriais para que o sistema continue em funcionamento. A figura 2.12 mostra o microcontrolador descrito. O AT89C4051-24PU tem 20 pinos, cada um com uma função específica.

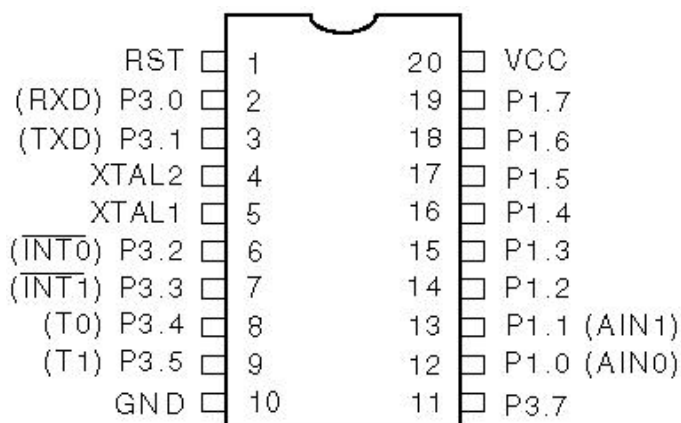


Figura 2. 12 - Pinagem do microcontrolador AT89C4051-24PU

A porta RST é o pino de reset. Todas as portas são inicializadas com o valor ‘um’ assim que este pino é acionado. Caso seja acionado por dois ciclos de máquina, o microcontrolador é reinicializado.

A porta três abrange os pinos de P3.0 a P3.7, excetuando-se o pino P3.6. São pinos de entrada e saída bidirecionais, dependendo da forma em que forem programados. A porta P3.6 é a porta do comparador analógico e não é acessível normalmente como as outras portas.

A porta VCC é a porta de alimentação do microcontrolador. A voltagem aqui aplicada é de 5 volts.

A porta um é uma porta de entrada e saída bidirecional de oito bits. Os pinos P1.2 a P1.7 fornecem pull-ups internos (se adequam a níveis lógicos mesmo que dispositivos externos sejam desconectados), enquanto os pinos P1.0 e P1.1 necessitam de pull-ups externos (necessitam de dispositivos externos para adequarem seus níveis lógicos), também sendo utilizados como entrada positiva (AIN0) e negativa (AIN1), respectivamente, do comparador analógico presente no microcontrolador. A saída da porta número um pode acionar diodos emissores de luz (LED) diretamente. Quando são programados com o valor ‘um’, são usados como entrada de dados.

A porta GND é utilizada como aterramento do microcontrolador, enquanto as portas XTAL1 e XTAL2 são, respectivamente, entrada e saída do circuito de sincronismo acoplado ao microcontrolador. Cristais de quartzo ou de cerâmica podem ser utilizados. Não há exigência do ciclo de *clock* externo do cristal, desde que as voltagens máximas e mínimas especificadas sejam seguidas.

2.5. Comparador analógico

Um comparador analógico é um pequeno dispositivo com duas entradas e uma saída. Consiste em duas portas de entrada analógicas e uma saída digital binária. Este dispositivo lê o sinal recebido em suas portas de entrada. Caso o sinal recebido seja maior que o sinal de referência ou aterramento, tem sua porta de saída saturada e envia um sinal elétrico. Quando o valor recebido em sua porta de entrada é igual ou inferior ao valor de referência, cessa o envio deste sinal. O resultado é uma saída binária de dois níveis, um e zero. Para se obter tal resultado, foi utilizado um amplificador operacional com comparadores analógicos internos. A figura 2.13 mostra os pinos do amplificador operacional utilizado, o LM324N.

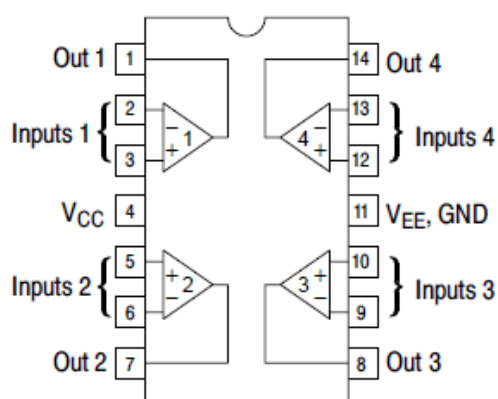


Figura 2. 13 - Amplificador operacional

O amplificador operacional mostrado na figura 2.13 tem, na verdade, quatro comparadores analógicos internos. Cada um deles com suas respectivas e independentes portas de entrada e saída. Os pinos três, cinco, dez e doze são as entradas positivas, enquanto os pinos dois, seis, nove e treze são as entradas negativas. Os pinos um, sete, oito e quatorze são as saídas de cada comparador analógico interno. O pino quatro é a alimentação do dispositivo, e o pino onze deve ser utilizado para aterramento.

CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é abordada a forma de implementação do circuito proposto, a relação entre os dispositivos utilizados, os testes realizados e o desenvolvimento da programação do microcontrolador, responsável por todo o controle lógico da potência aplicada à carga.

3.1 Visão geral

Para o desenvolvimento do projeto do circuito de controle de potência, foi utilizada uma placa de circuito impresso. A figura 3.1 mostra o esquema do circuito.

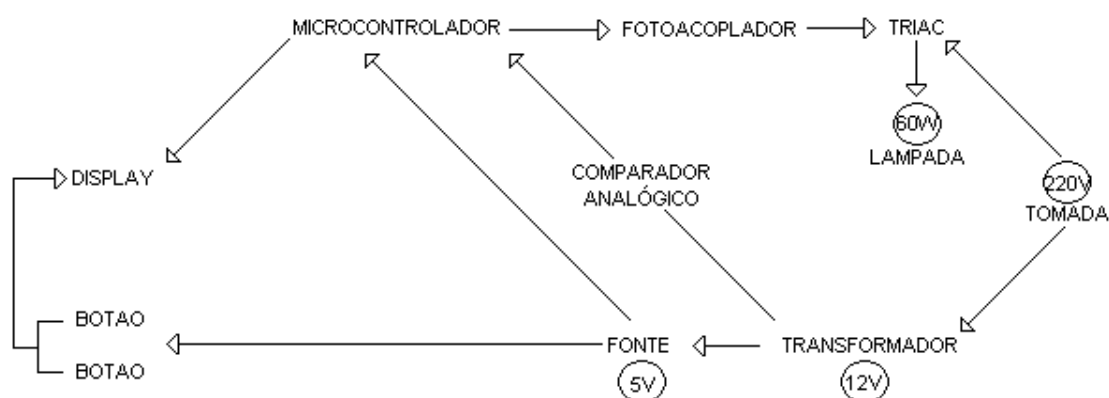


Figura 3. 1 - Esquema do circuito

Para o desenvolvimento e implementação do circuito, foi utilizado um microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU, um fotoacoplador MOC3020, um amplificador operacional LM324N, um transformador de 200 miliampères, um TRIAC TIC246D, dois botões *push-buttons* e um *display* de cristal líquido, além de componentes eletrônicos auxiliares. Como carga resistiva, foi utilizada uma lâmpada incandescente de 60 watts.

Para o controle lógico da potência, foi utilizada a linguagem de programação Assembly, com o código-fonte gravado no microcontrolador utilizando-se uma gravadora MACSYM para microcontroladores AT89CX051, com um compilador (assemblador) AVMAC51. A figura 3.2 mostra o diagrama de blocos simplificado do projeto. O diagrama de blocos do software desenvolvido será mostrado em tópicos seguintes.

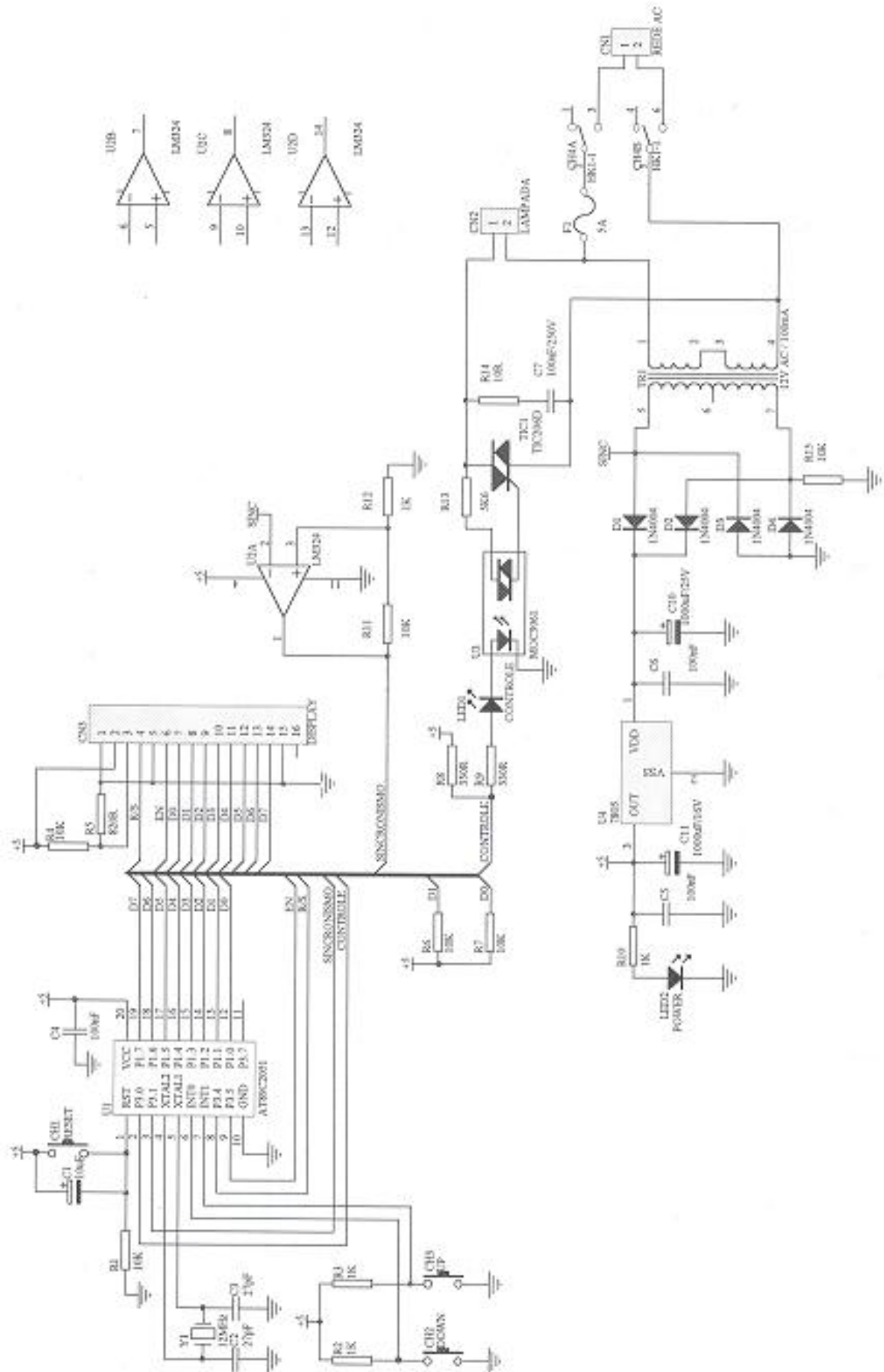


Figura 3.3 - Circuito completo de controle de potência

Inicialmente, existia apenas a idéia de controle de potência em uma carga resistiva. Para se realizar este controle, a corrente oriunda da rede de 220 volts seria chaveada por um dispositivo elétrico, o TRIAC. Um microcontrolador enviaria os comandos de chaveamento, que trataria os dados inseridos pelo usuário por meio de botões. Estes botões e o microcontrolador deveriam ser alimentados eletricamente com corrente contínua. Para tanto, deveria ser adotado um circuito regulador de tensão. A corrente chaveada pelo TRIAC deveria alimentar uma carga resistiva. Escolheu-se, portando, uma lâmpada de 60 watts, pela praticidade e visualização dos efeitos da corrente na carga. A saída de dados deveria existir como um *feedback* para o usuário, que poderia ser dado por meio de um *display* de cristal líquido. Para evitar danos ao microcontrolador durante o envio do sinal de disparo ao TRIAC, um acoplador óptico deveria também ser implementado. Para a transformação da tensão de 220 volts da rede elétrica para 5 volts, necessária para alimentar os dispositivos do circuito, foi incluído no projeto um transformador.

A linha de raciocínio acima explica a necessidade de inclusão de cada um dos dispositivos do projeto. Nos tópicos seguintes será mostrado como cada parte do circuito foi desenvolvida.

3.2.1 Segmento de regulador de tensão

Para a alimentação elétrica dos dispositivos existentes no projeto e explicados adiante, foi implementada uma fonte de alimentação que baixa a tensão de 12 volts da saída do transformador para 5 volts, que é a tensão de alimentação do circuito. O segmento do circuito tratado neste tópico é o segmento responsável pela regulação de tensão, ou seja, responsável por retirar a tensão de 220 volts da rede elétrica e retificá-la em uma tensão de alimentação interna do circuito de 5 volts. A figura 3.4 mostra o segmento regulador de tensão do circuito.

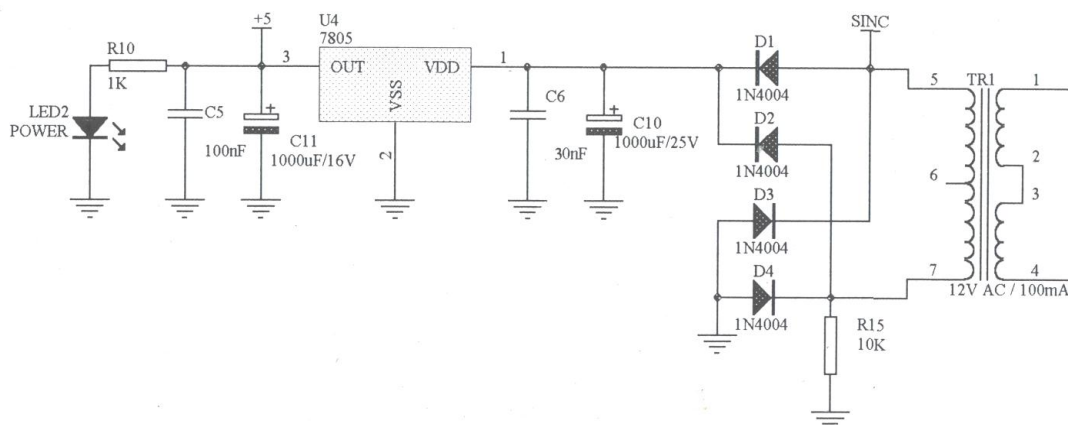


Figura 3. 4 - Segmento regulador de tensão

Na tomada, ou seja, na fonte de alimentação externa, a tensão medida é de 220 volts. O transformador de 200 miliampères reduz esta tensão para 12 volts. Seria possível baixar a tensão diretamente para 5 volts, caso o transformador comercial utilizado tivesse estas características.

Os diodos em ponte irão tratar esta tensão de 12 volts e retificá-la. Retificar uma tensão significa dizer que o circuito retificador de onda completa em ponte irá converter os sinais negativos de tensão da senóide em sinais positivos. O resultado deste processo é uma tensão retificada pulsante de 12 volts.

No meio ciclo positivo da tensão, o diodo D1 recebe um potencial positivo em seu ânodo e o diodo D2 recebe um potencial negativo no cátodo. Conseqüentemente, D1 e D4 entram em modo de condução, enquanto D2 e D3 ficam reversamente polarizados. No meio ciclo negativo a situação se inverte. D1 e D4 ficam reversamente polarizados, enquanto D2 e D3 conduzem corrente. O resultado final desta retificação é uma onda de tensão pulsante, conforme exemplificado na figura 3.5.

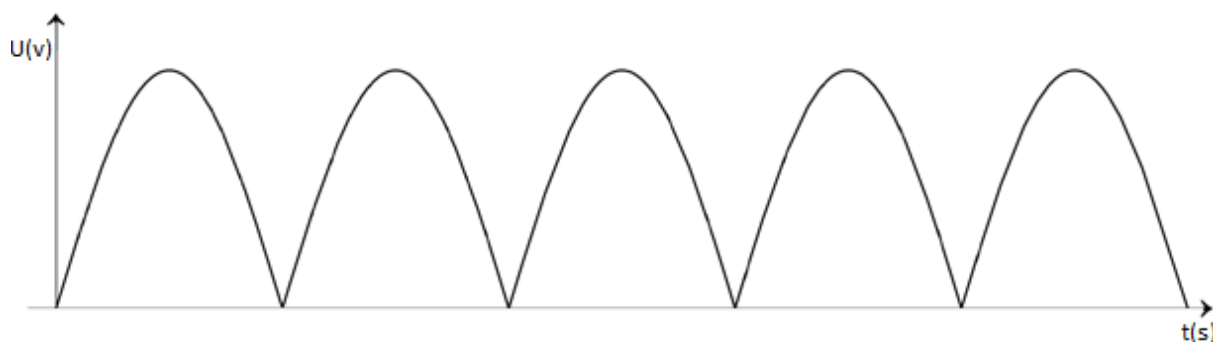


Figura 3. 5 - Onda de tensão retificada pulsante

A tensão no circuito, que agora é uma tensão retificada pulsante de 12 volts, será amortecida pelo capacitor C10 de 1000 uF (micro faraday). Desta forma, a tensão será posteriormente regulada para a alimentação dos componentes do circuito.

A fim de regular a tensão do circuito e alimentar os dispositivos, utilizou-se um regulador de tensão. Sua função é baixar a tensão de 12 volts para 5 volts e regulá-la como corrente contínua. Os capacitores C5 e C6 presentes no circuito de 100nF (nano Faraday) e 30nF, respectivamente, são recomendações do *datasheet* do dispositivo regulador de tensão, e servem para evitar oscilações no mesmo. O resistor R10 de 1k existe apenas para assegurar o acendimento do LED presente no segmento do circuito. Segue na figura 3.6 a forma da onda regulada ideal.

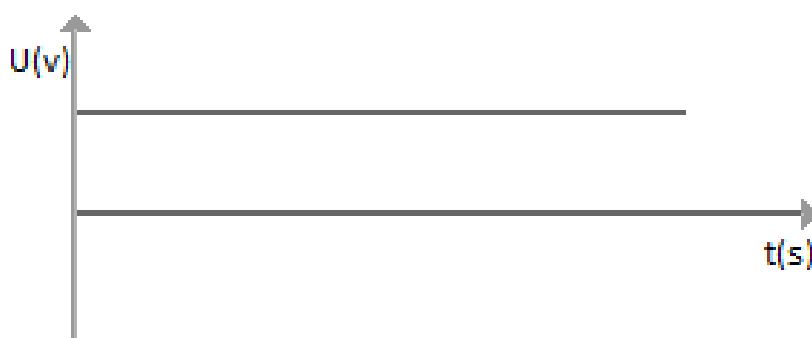


Figura 3. 6 - Onda regulada

Ao final do segmento de alimentação do circuito, notamos a presença de um capacitor C11 de 1000uF. Sua função é eliminar quaisquer rampas que possam existir na corrente regulada de 5 volts, que é usada para alimentar eletricamente os dispositivos. A figura 3.7

mostra o sinal regulado obtido e testado em laboratório, usado para alimentar os dispositivos elétricos do projeto.

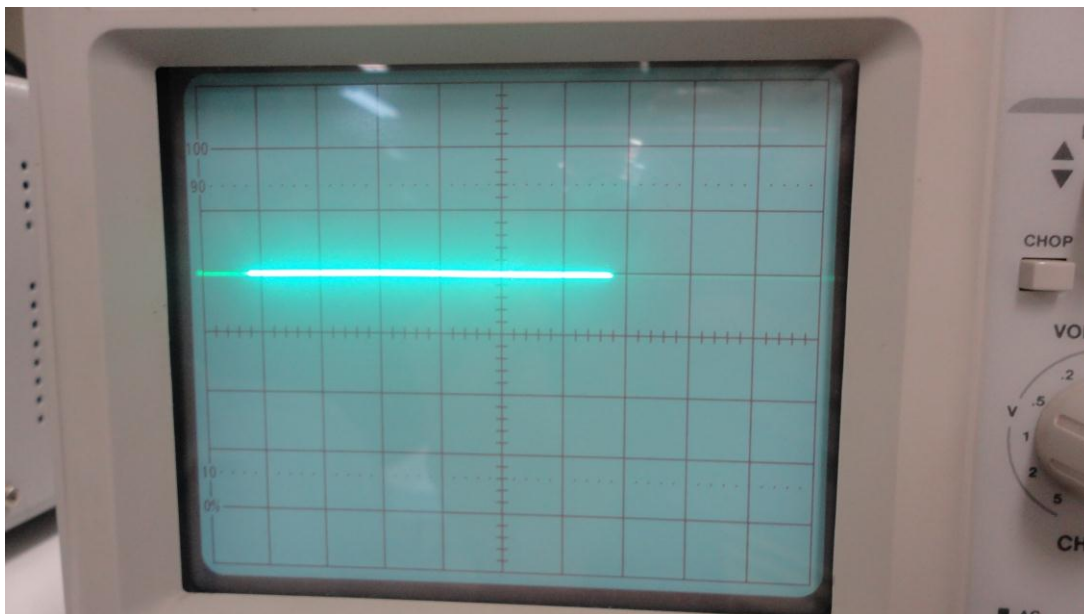


Figura 3. 7 - Sinal regulado

3.2.2 Segmento de disparo do triac

Os disparos do TRIAC, por meio de comandos emitidos pelo microcontrolador, são realizados por meio do segmento do circuito mostrado na figura 3.8.

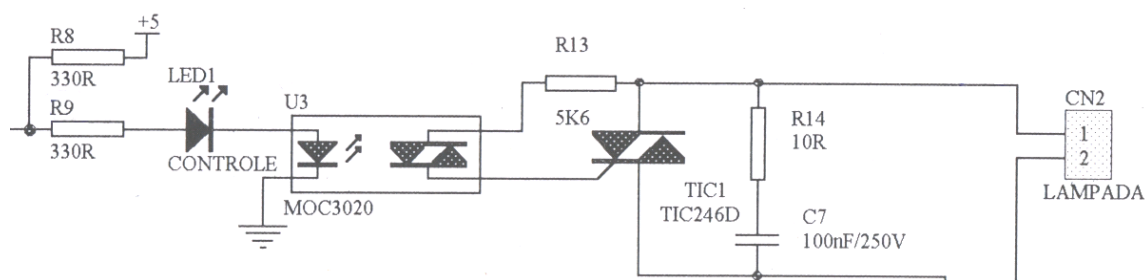


Figura 3. 8 - Segmento de disparo do TRIAC

O microcontrolador emite um sinal no pino dois (porta P3.0) no momento em que é requisitado o disparo do TRIAC. O microcontrolador está na outra ponta do barramento onde se encontra o LED e os resistores R8 e R9. Estas resistências de 330Ω limitam a corrente que é enviada ao MOC3020. Como a porta do microcontrolador não tem *pull-up* externo, o

resistor R8 é alimentado com 5 volts. Por estar em série com o Resistor R9 e com o LED1, segundo a lei de Ohm, a corrente será igual ao quociente do valor da tensão neste ponto do circuito, ou seja, 4,3 volts, pela soma das resistências de 330Ω , ou seja, aproximadamente 6 miliampères.

Quando o sinal de corrente excita o MOC, o LED interno se acende, polarizando a base do fototriac presente em sua estrutura interna. Desta forma, este fototriac conduz corrente pelo restante do circuito, sem contato entre o microcontrolador e o TRIAC. Esta corrente é suficiente para disparar o gatilho do TRIAC, e deve ser de 50 miliampères, segundo seu *datasheet*. Então, dependendo do tempo de disparo do TRIAC após o ponto em que a senóide de tensão da rede passa por seu ponto zero, a potência aplicada à carga é controlada. O segmento do circuito formado pela resistência R14 de 10Ω e o capacitor C7 de 100nF é um circuito *snubber*, e serve para controlar a taxa de variação da tensão, fazendo com que o TRIAC apresente um menor pico de tensão e não tenha disparos aleatórios indesejados. O resistor R13 serve para limitar a corrente sobre o *gate* do TRIAC.

Quando a senóide de tensão chegar ao ponto zero novamente, a corrente que passa no TRIAC chegará à zero, sendo inferior à corrente mínima de manutenção, interrompendo a condução no dispositivo. Após este ponto, um novo sinal deve ser emitido pelo microcontrolador a fim de excitar novamente o fototriac que, por sua vez, disparará o TRIAC, permitindo novamente a passagem de corrente e controlando a potência aplicada á carga.

3.2.3 Segmento do comparador analógico

A fim de controlar o tempo de disparo do TRIAC em relação à fase da tensão da rede, é usado o amplificador operacional LM324N, com um comparador analógico interno. A figura abaixo mostra o segmento do circuito onde este dispositivo está alocado.

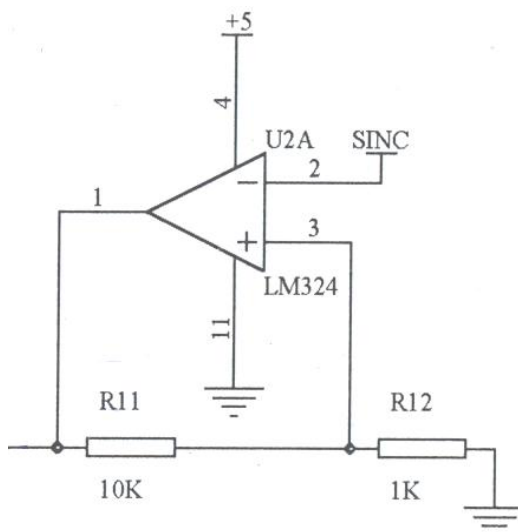


Figura 3. 9 - Segmento do comparador analógico

Após a tensão ser baixada de 220 volts para 12 volts, o sinal desta tensão é enviado ao comparador analógico LM324N para o pino dois. O comparador consiste em duas portas de entrada analógicas e uma saída digital binária. Uma de suas duas entradas está aterrada (pino três), enquanto a outra é alimentada com 12 volts (pino dois). Os valores lidos de tensão serão comparados com a tensão de referência. Caso o valor da entrada seja maior que a tensão de referência, a saída do comparador analógico irá saturar para o valor 'um'. Se esta tensão for igual ou menor ao valor do aterramento, o valor de saída será zero. A figura 3.10 mostra o diagrama de blocos do comparador analógico.

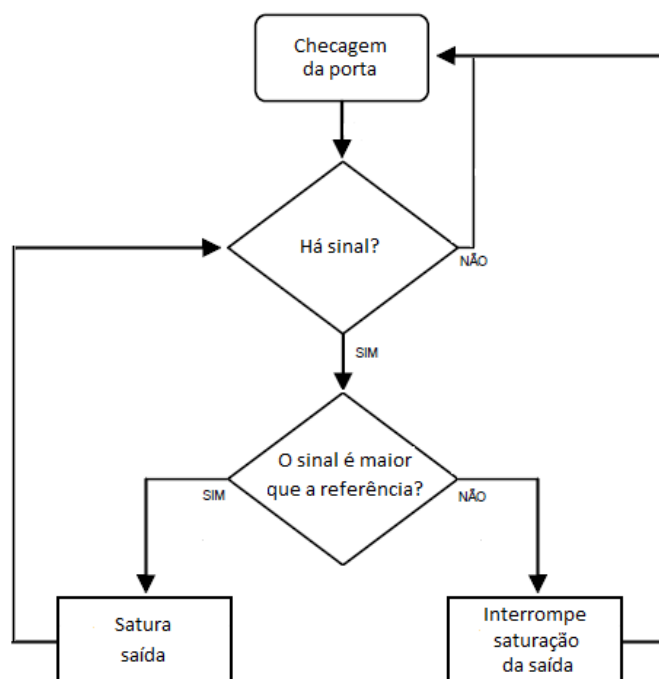


Figura 3. 10 - Diagrama de blocos do comparador analógico

Desta forma, tem-se uma onda quadrada binária na saída do comparador, de mesma fase que a onda de corrente alternada da entrada. Na figura 3.11 é mostrado o sinal de saída ideal do comparador analógico, enviado a uma das portas do microcontrolador.

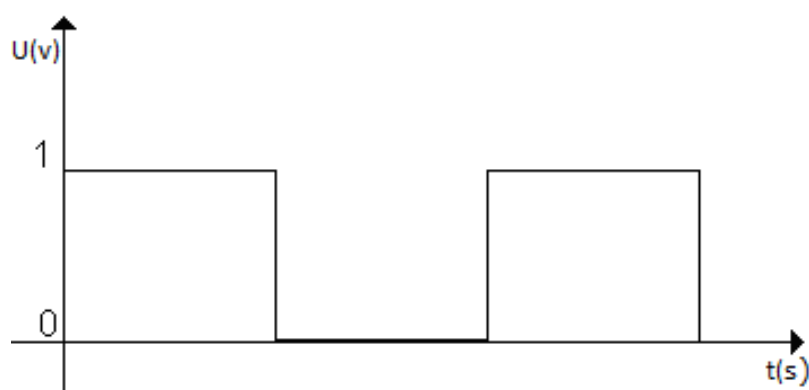


Figura 3. 11 - Saída do comparador analógico

A finalidade da leitura deste sinal é verificar se a senóide de tensão está passando pelo ponto zero ou não. Com este sinal é possível controlar acionamento do TRIAC, já que os tempos de seus disparos serão contados a partir do início de cada meio ciclo da tensão de rede, ou seja, toda vez que este sinal passa pelo ponto zero. Por meio da porta P3.1 (pino três),

este sinal será lido digitalmente pelo microcontrolador e os cálculos para o disparo do TRIAC efetuados. A figura 3.12 mostra o sinal percebido na saída do comparador analógico.

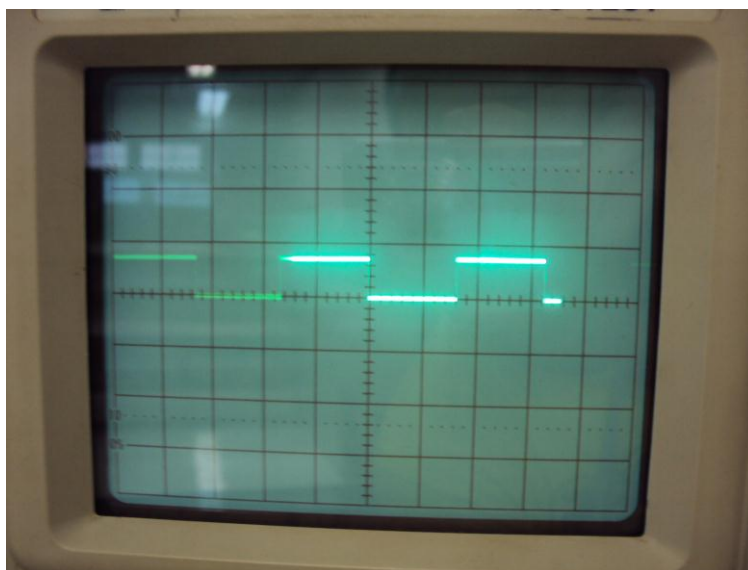


Figura 3. 12 - Sinal de saída do comparador analógico

3.2.4 Segmento de sincronismo e reset do microcontrolador

Para estabelecer o sincronismo entre os ciclos de máquina do microcontrolador e as instruções processadas, devemos utilizar um cristal de sincronismo conectado aos pinos quatro e cinco do microcontrolador, conforme recomendações de seu *datasheet*. Como o cristal utilizado tem uma frequência de 12Mhz (megahertz), é necessário um ciclo de máquina do microcontrolador para executar uma instrução, durando cada uma um microsegundo. Sem a presença do cristal, o sincronismo do microcontrolador não pode ser realizado. Segue na figura 3.13 o segmento de sincronismo.

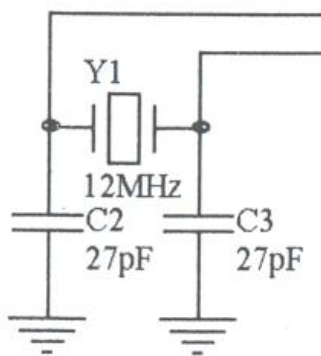


Figura 3. 13 - Segmento de sincronismo do microcontrolador

Os capacitores C2 e C3 de 27pF (pico Faraday) estabilizam a frequência do cristal, diminuindo a margem de erro. Esta recomendação está presente no *datasheet* do microcontrolador.

Na porta número um do microcontrolador existe o circuito de reset. A resistência de 10k Ω e o capacitor de 10uF causam o reset do dispositivo toda vez que é ligado. Há também um botão que causa o reset quando pressionado. No momento do reset, todas as portas do microcontrolador têm o valor ‘um’ atribuído, e logo em seguida voltam para o estado original. Todas as instruções serão reiniciadas após este procedimento. A figura 3.14 mostra o circuito descrito.

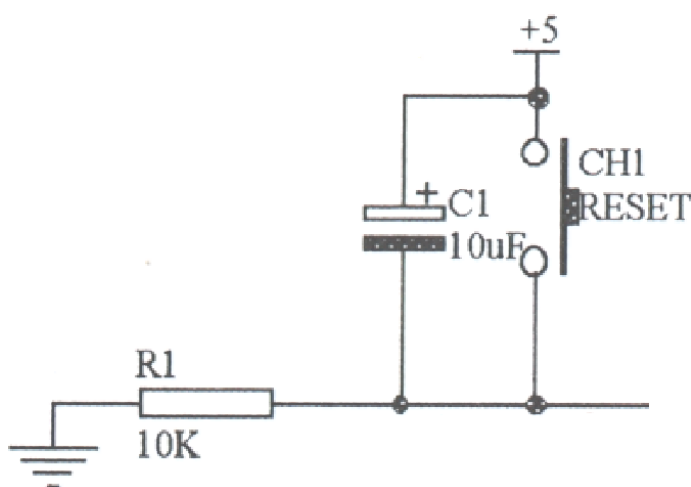


Figura 3. 14 - Circuito de reset do microcontrolador

3.2.5 Segmento de exibição de dados

Para exibição dos dados inseridos pelo usuário, existe no circuito um *display* de cristal líquido. O software desenvolvido executará rotinas de incremento e decremento dos valores de tensão aplicados à carga. Cada um destes valores será exibido no *display* e mostrado ao usuário. A figura 3.15 mostra o segmento de exibição de dados ao usuário.

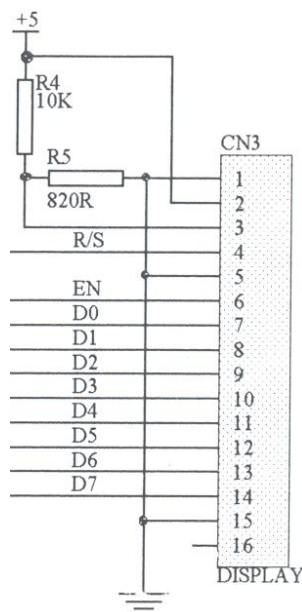


Figura 3. 15 - Segmento de exibição de dados

De acordo com as rotinas de programação, todos os pinos de um a quatorze são usados para transmissão dos dados a serem exibidos no *display*. Pelos pinos um e dois, VSS e VDD, alimentam eletricamente o dispositivo com 5 volts. O pino três, VEE, é utilizado para regular o contraste do display. O pino quatro, RS, recebe dados enviados pelo microcontrolador que indicam se o dado presente no barramento é um comando ou um dado. O pino cinco, R/W, está aterrado, já que não é utilizado, e lê o sinal enviado pelo microcontrolador e verifica se um dado será lido ou gravado no display. O pino seis, E, é uma porta de controle, que habilita o display a aceitar dados ou instruções vindas do microcontrolador. Os pinos de sete a quatorze recebem os dados enviados pelo microcontrolador.

3.2.6 Segmento de entrada de dados

Este segmento do circuito é a interface de entrada de dados do usuário. Por meio dos botões acoplados ao circuito, a porcentagem de potência é regulada. A figura 3.16 mostra o segmento citado.

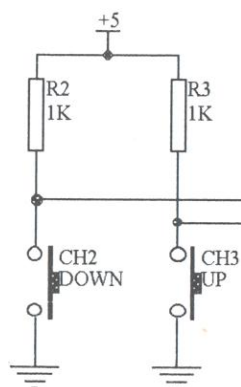


Figura 3. 16 - Segmento de entrada de dados

Os botões implantados no circuito são do tipo normalmente fechados. Toda vez que é pressionado um botão, o sinal enviado ao microcontrolador por meio dos pinos seis ou sete, dependendo se o sinal for decremental ou incremental, é interrompido. Estes sinais serão tratados pela rotina de programação como decremento ou incremento do tempo que o TRIAC aguarda para começar a chavear a tensão.

Os resistores R2 e R3 de $1k\Omega$ foram inseridos para limitar a corrente que será enviada ao microcontrolador quando o botão estiver fechado. Pela lei de Ohm, a tensão de entrada no microcontrolador é igual ao produto da resistência pela corrente. Caso a resistência não exista, a corrente que entrará no microcontrolador será igual à divisão da tensão de 5 volts por um valor próximo a zero, que resultará em uma corrente muito grande, queimando o microcontrolador. Com a resistência de $1k\Omega$, a corrente será de 5 miliampères.

3.2.7 Segmento do microcontrolador

Este é o dispositivo que fará o controle dos disparos do TRIAC e, conseqüentemente, o controle da tensão aplicada à carga. Suas portas são utilizadas tanto para entrada quanto para saída de dados. A figura 3.17 mostra a pinagem do microcontrolador.

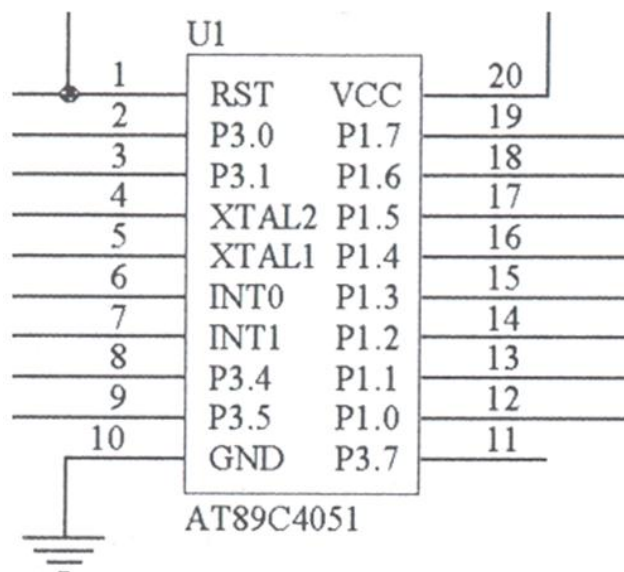


Figura 3. 17 - Pinagem do microcontrolador

Cada dispositivo ligado ao microcontrolador é conectado por meio de um pino ou portas, definidas na rotina de programação. Este tópico será tratado adiante.

3.3 Método de controle

Para se realizar o controle da potência aplicada à carga, é utilizado o tempo de disparo do TRIAC após o momento em que a senóide de tensão passa pelo ponto zero. Para isso, algumas variáveis devem ser consideradas, como fatores não-lineares de funcionamento dos dispositivos físicos, a histerese da lâmpada e o tempo que as próprias rotinas de programação gastam para execução.

Em uma rede de alimentação de 220 volts, a frequência de oscilação da rede fica em torno de 60 hertz. Isto significa dizer que a rede tem sessenta ciclos por segundo, ou seja, o período da tensão CA se repete sessenta vezes em um segundo. Pela fórmula da frequência, temos que esta é igual a uma unidade dividida por seu período. Desta forma, 0,0167 segundos é o período de um ciclo completo de uma senóide de tensão, ou 16,6 milissegundos, conforme mostrado na equação 3.1.

$$T = 1 / F = 1 / 60 = 0.0167 \text{ segundos}$$

Equação 3. 1 - Cálculo da frequência

O TRIAC, por ser um tiristor bidirecional, conduzirá nos dois sentidos, positivo e negativo, disparando com qualquer sinal de pulso, positivo ou negativo. Desta forma se controla o tempo de seu disparo considerando-se apenas meia onda ou um meio ciclo, sendo os cálculos para disparo do dispositivo válidos também no segundo meio ciclo, independentemente de seu sinal. O período ideal da senóide de tensão CA é mostrado na figura 3.18.

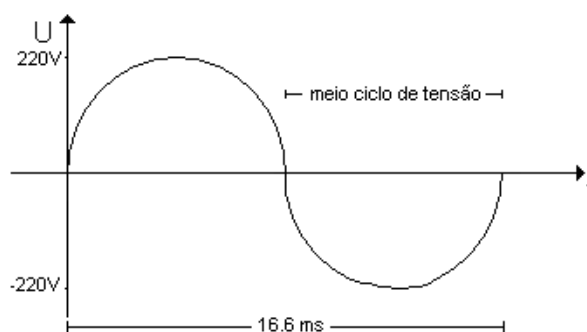


Figura 3. 18 - Período da senóide de tensão

Para efetuar o controle, deve-se também reconhecer onde a senóide passa pelo zero. Esta mudança de estado pode ser verificada na porta do comparador analógico. Quando o valor pontual da onda é maior que zero, o comparador reconhecerá como ‘um’, e enviará um sinal para o microcontrolador. Da mesma forma, quando a senóide assumir o valor de zero ou menor, o comparador cessará este envio de informação. As rotinas de programação capturam estas informações por leituras da porta 3.1 (pino três), para o controle do disparo após o zero da senóide.

Cada tempo de período considerado será então de 8.3 milisegundos, que é o período de meia onda. Para efeitos de cálculo será utilizado um período de meio ciclo igual a 8 milisegundos, pois 0,3 milisegundos podem ser desprezados por não causarem grande variação da tensão aplicada à carga e, conseqüentemente, na luminosidade da mesma.

Para o cálculo de incrementos de potência, o período de meio-ciclo da senóide, de 8 milisegundos, foi dividido em 10 partes iguais, cada uma equivalendo a 10% da potência total que pode ser aplicada à carga resistiva. Desta forma, a cada incremento ou decremento comandado pelo usuário, tem-se o acréscimo ou decréscimo de 800 microsegundos ao ponto de disparo do TRIAC após o reconhecimento do ponto zero.

Caso o tempo inicial do TRIAC seja zero, e a cada incremento sejam adicionados 800 microsegundos ao cálculo de disparo do TRIAC, a potência aplicada após o primeiro disparo seria próxima ao valor máximo. Isto se dá pelo fato de que, caso disparado no início do meio ciclo de tensão, praticamente toda a senóide é chaveada, e toda tensão é aplicada à carga. Para que isso não ocorra, e para que o primeiro incremento do TRIAC seja próximo do valor mínimo de tensão aplicada à carga, escolheu-se como ponto inicial do disparo o final da onda, ou seja, o ponto da senóide de tensão CA imediatamente anterior a 8 milisegundos, com cada incremento do botão diminuindo 800 microsegundos desse tempo total. Desta forma, o usuário, por meio do botão incremental, insere o valor de potência requerido, e a rotina de programação lerá seu complemento. Caso o valor inserido pelo usuário seja de 25% de potência, a rotina reconhecerá este valor como seu complemento, e aguardará 75% do tempo total do período do semi-ciclo para efetuar o disparo, ou seja, 6 milisegundos a partir do ponto zero.

Porém, apesar de estar teoricamente correto este cálculo, não foi possível observar os resultados práticos. Mesmo com os valores corretos e a rotina de programação desenvolvida de modo satisfatório, os valores de tensão medidos em cada uma das porcentagens requeridas pelo usuário não estavam de acordo com a proposta de incrementar de 10% em 10% o valor da tensão eficaz aplicada à carga resistiva.

Para se averiguar o motivo destes valores errôneos, o software desenvolvido foi modificado. O *range* de incremento de 10% foi modificado para um range de incremento de 1% apenas. Com isto, pode-se averiguar o motivo pelo qual os valores não estão corretos.

Neste experimento, verificou-se que os valores de tensão aplicados à carga resistiva não estavam totalmente lineares. Esperava-se, com um incremento de 1% de tensão, que a diferença de tensão entre um valor e o valor subsequente fosse de 2,2 volts aproximadamente, para a rede elétrica de 220 volts, o que não foi constatado. Estes valores medidos não apresentavam aspectos de linearidade. Ao tempo em que os valores iniciais de porcentagem tinham uma divergência pequena dos valores ideais, as porcentagens finais tinham diferenças muito grandes dos valores calculados, indicando um acúmulo nos tempos de execução das rotinas de programação.

Apesar de os valores de tensão eficaz referentes ao intervalo de 10% a 100% existirem quando medidos, não correspondiam ao valor de tensão eficaz exibido ao usuário no *display*. A tabela 3.1 mostra os valores de porcentagem de potência, os valores exibidos no display de

porcentagem de tensão eficaz, os valores ideais calculados de tensão eficaz e os valores medidos de tensão eficaz após a modificação do programa.

| Valor exibido no display relacionado à tensão eficaz (percentual de tensão eficaz) | Percentual de potência média calculado | Valor de tensão eficaz calculado (volts) | Valor de tensão eficaz medido (volts) |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| 100% | 100% | 227 | 227 |
| 90% | 81% | 204,3 | 204 |
| 80% | 64% | 181,6 | 182 |
| 70% | 49% | 158,9 | 161 |
| 60% | 36% | 136,2 | 136 |
| 50% | 25% | 113,5 | 113 |
| 40% | 16% | 90,8 | 92 |
| 30% | 9% | 68,1 | 69 |
| 20% | 4% | 45,4 | 42 |
| 10% | 1% | 22,7 | 22 |
| 0% | 0% | 0 | 0 |

Quadro 3. 1 - Valores calculados e medidos com range de 10%

Para que os valores sejam exibidos no display de forma correta, proporcionalmente ao valor de tensão eficaz medido, utilizou-se uma tabela interna no programa, referenciando-se aos valores corretos de tensão aos valores de porcentagem exibidos no display. Desta forma, quando o display exibe o valor de 70% da tensão eficaz requerida pelo usuário, a rotina de programação busca o valor referente ao endereço de memória de 70% da tensão calculada pela rotina, aplicando 161 volts na carga resistiva, conforme proposto inicialmente. Estes valores são aproximados, pois dependem da variação da própria rede elétrica e dos tempos das rotinas de programação.

Estes cálculos são transparentes ao usuário. Como *feedback*, a tensão requerida será exibida no *display* e a tensão eficaz correta será aplicada na lâmpada.

3.4 Software de controle

O software desenvolvido em assembly tem como finalidade principal o controle dos disparos do TRIAC por meio das entradas de dados. Também é usado para cálculo do período da tensão alternada, exibição da saída ao usuário por meio do *display* de cristal líquido e leitura dos sinais enviados pelo comparador analógico para controle do ponto de disparo. A figura 3.19 mostra o diagrama de blocos do software do projeto.

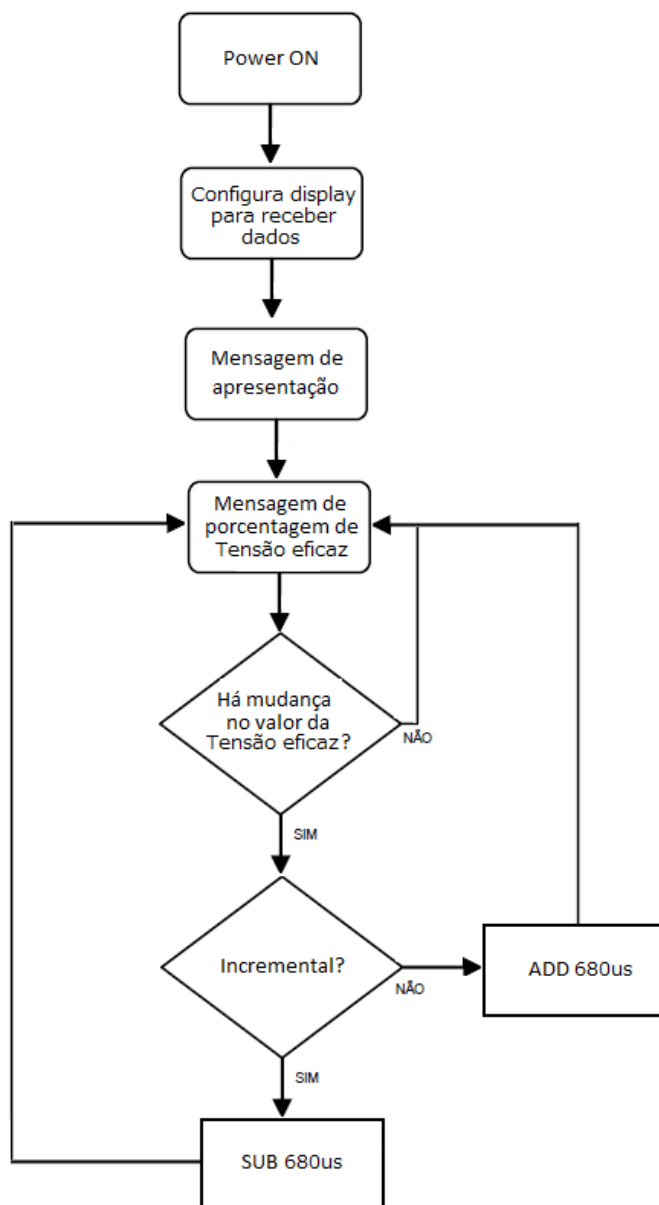


Figura 3. 19 - Diagrama de blocos do software

Para a programação, foi utilizado o editor de textos do Windows e do MS-DOS. O programa foi gravado no microcontrolador ATMEL AT89C4051-24PU por uma gravadora MACSYM, com compilador AVMAC51. Devido ao *driver* do hardware da gravadora, o ambiente de programação foi o Windows 98. A gravadora utiliza a porta paralela do computador, e seu *driver* só funciona no referido sistema operacional por ser antigo e o fabricante não disponibilizá-lo para versões mais atuais de sistemas operacionais.

Ao se ligar o circuito na rede elétrica, a rotina de programação gravada no microcontrolador envia primeiramente sinais de controle para o *display* para que seja preparado para receber dados e instruções. Até este momento, nenhum dado é gravado.

Também são habilitadas as portas P3.1 e P3.3 para leitura dos sinais enviados pelo comparador analógico e pelo botão incremental, respectivamente, ao mesmo tempo que a porta 3.0 é preparada para enviar sinais para o disparo do TRIAC.

Após este momento, as primeiras mensagens são gravadas no *display*. Na primeira linha é passado um parâmetro para que a mensagem de boas vindas seja exibida, enquanto a segunda linha exibe a versão do software gravado. Estes dados podem ser editados pelo programador.

Em rotinas internas o registrador R6 é zerado, que é onde os dados exibidos no *display* são gravados. Também a tabela de valores de tensão é criada, onde R1 é o registrador que guarda os valores de porcentagem entre 0% e 100%, a se iniciar no valor de memória 24H, para 0%, terminando no endereço de memória 2EH, para o valor de 100%. R5 é o registrador que guarda o valor armazenado em cada endereço de memória de R1. É por meio de R5 que os valores exibidos de tensão eficaz no *display* são vinculados ao valor de tensão aplicada à carga resistiva. A tabela 3.2 mostra os valores de R5 em cada um dos endereços de R1.

| Percentual de tensão aplicada | Percentual de potência aplicada | Endereço de memória de R1 | Valor de R5 armazenado no endereço de R1 |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| 100% | 100% | #2E | 1 |
| 90% | 81% | #2D | 28 |
| 80% | 64% | #2C | 37 |
| 70% | 49% | #2B | 44 |
| 60% | 36% | #2A | 51 |
| 50% | 25% | #29 | 58 |
| 40% | 16% | #28 | 64 |
| 30% | 9% | #27 | 71 |
| 20% | 4% | #26 | 79 |
| 10% | 1% | #25 | 88 |
| 0% | 0% | #24 | 91 |

Quadro 3. 2 – Valores de R5 nos endereços de memória de R1

A mensagem acima descrita é exibida por 4 segundos. Após este período, a mensagem inicial de boas vindas e de versão do software é substituída pela mensagem de *feedback* ao usuário, exibindo o valor percentual de tensão eficaz aplicada à lâmpada. Com esta mensagem exibida, as portas referentes aos botões começam a ser lidas, aguardando a entrada de dados do usuário.

Se em um primeiro momento o usuário aperta o botão decremental, mesmo sendo exibida uma mensagem de 0% de tensão aplicada nada ocorre, já que o software não possibilita a entrada deste dado inválido. O mesmo ocorre caso haja uma entrada de dado incremental com a tensão aplicada já em 100%.

Com o pressionamento do botão incremental, os valores de R6, R1 e R5 são incrementados em uma unidade ou em um endereço de memória, lembrando que o incremento da mensagem no *display* se dará de 10% em 10%. Com isto, os parâmetros para controle do TRIAC são gravados.

Para cada unidade solicitada pelo usuário em R5 por meio do *display*, serão contados 68 microsegundos, que é 1% do período de meia onda considerado, 6,8 milisegundos. Como o tempo do período da senóide é de 16 milisegundos aproximadamente, utilizou-se como base para os cálculos 8 milisegundos, que é o período de meia onda apenas. Destes 8 milisegundos, foi constatado empiricamente que os valores mais aproximados dos valores ideais de tensão aplicada à carga se davam quando era desconsiderados 1,2 milisegundos do período de meia onda. Isto se dá por fatores não lineares do circuito, e também pelo tempo que as rotinas de programação levam para serem executadas pelo microcontrolador.

Enquanto houver sinal de entrada na porta do comparador analógico o tempo será contado para o disparo do TRIAC. Assim que o sinal é detectado pelo microcontrolador, um tempo determinado por R5 é aguardado, e então é enviado um sinal para que o TRIAC mantenha-se aberto. O TRIAC mantém-se em seu estado atual enquanto o sinal na porta do comparador analógico não for modificado, seja disparado ou impedindo o chaveamento da tensão sobre a lâmpada.

Cada vez que o sinal do comparador analógico é modificado, ou seja, muda de zero para um ou vice-versa, os botões são checados, verificando-se assim se o usuário deseja incrementar ou decrementar a tensão aplicada, até que o circuito seja desligado.

Abaixo segue o código brevemente comentado, com algumas características importantes dos segmentos do software apresentados salientadas.

Uma mensagem de apresentação é exibida no *display*, contendo o nome do projeto e a versão do software. Na figura 3.20 é mostrado o cabeçalho do programa, a declaração das portas do microcontrolador e as mensagens de apresentação.

```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
$ALLPUBLIC
$PAGINATE

        DEFSEG  ABSSEGNAME, ABSOLUTE
        SEG     ABSSEGNAME

;#####
;CIRCUITO PARA CONTROLE DE POTENCIA UTILIZANDO TIRISTOR TRIAC E MICROCONTROLADOR 8051
;CENTRO UNIVERSITARIO DE BRASILIA
;ENGENHARIA DA COMPUTACAO
;FERNANDO DE MELO MACIEL - 20317542
;2 SEMESTRE DE 2010
;#####

TRIAC      EQU     P3.0
COMPARADOR EQU     P3.1
BOT_DEC    EQU     P3.2
BOT_INC    EQU     P3.3
COMAND_DADO EQU     P3.4
HAB_DISPLAY EQU     P3.5
DOLAR      EQU     '$'

        ORG 0000H
        LJMP INICIO

MENS       DB      'CONTROLE DE POT.$'
VER        DB      'Ver:1.0 30/06/10$'
PER        DB      'PERCENTUAL    $'

```

Figura 3. 20 - Cabeçalho do programa

Esta mensagem inicial se mantém por quatro segundos. Após este período, onde as portas de entrada de dados ainda não estão ativas, é mostrado no *display* uma mensagem indicando o que é exibido, além do percentual de tensão inicial, zero. Com esta mensagem, as portas do microcontrolador responsáveis por ler os incrementos e decrementos de porcentagem de tensão inseridos pelo usuário já estão ativas, aguardando a entrada de dados. Para cada instrução ou dado enviado ao *display* para exibição existe um tempo mínimo para que a instrução seja reconhecida ou o dado escrito. A figura 3.21 mostra as rotinas para que as instruções e dados sejam reconhecidos e gravados no *display*.

```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####ROTINAS DE CONFIGURACAO DO DISPLAY#####

TEMPO_DADO:

        SETB    HAB_DISPLAY
        SETB    COMAND_DADO
        MOV     R2, #1
        LCALL   MIL_MS
        CLR     HAB_DISPLAY
        RET

TEMPO_INST:

        SETB    HAB_DISPLAY
        CLR     COMAND_DADO
        MOV     R2, #3
        LCALL   MIL_MS
        CLR     HAB_DISPLAY
        RET

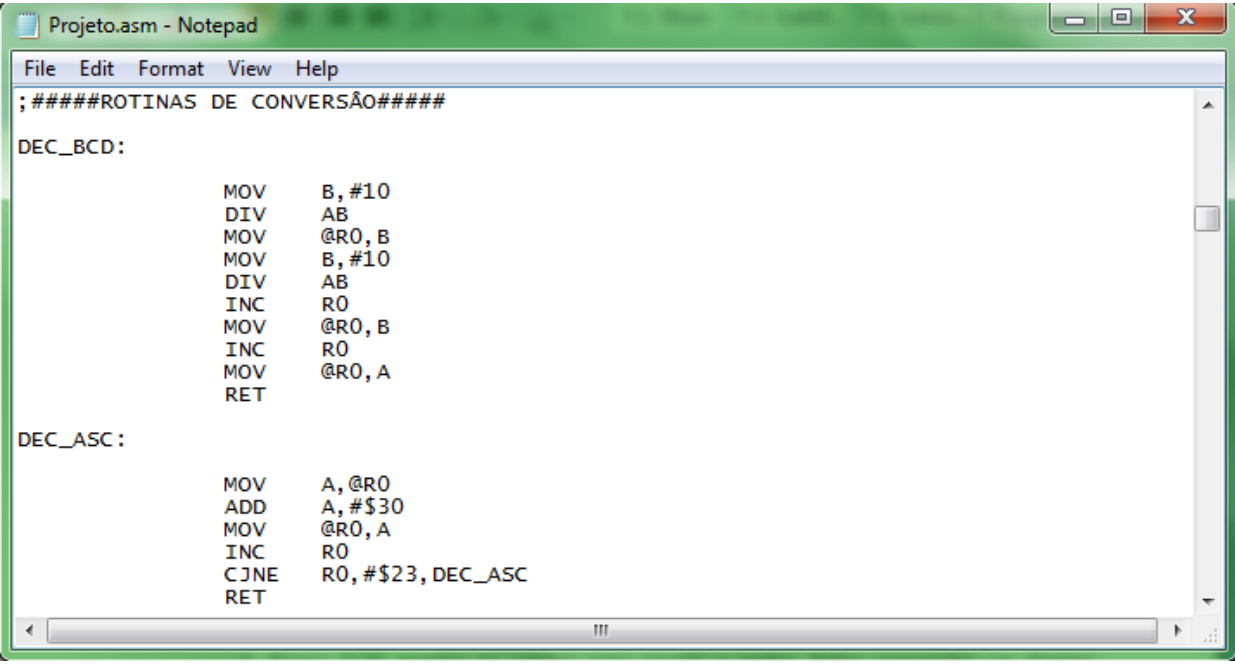
CONFIG_DISP:

        MOV     P1, #38
        LCALL   TEMPO_INST
        MOV     P1, #0C
        LCALL   TEMPO_INST
        MOV     P1, #06
        LCALL   TEMPO_INST
        MOV     P1, #01
        LCALL   TEMPO_INST
        RET

```

Figura 3. 21 - Rotinas de configuração do display

O *display* não entende os dados na forma de linguagem humana. Para que sejam gravados e exibidos, deve-se converter os sinais enviados pelo microcontrolador em uma forma que o *display* os entenda e os apresente de forma compreensível. Para tanto, deve-se converter os valores em código BCD (*Binary-Coded Decimal* - Codificação Binária Decimal), que é uma codificação utilizada para representar os números decimais de 0 a 9. Também devem ser convertidos os sinais de código binário para letras, segundo uma tabela de conversão de valores binários para decimais e hexadecimais, a tabela ASCII. A figura 3.22 mostra estas rotinas de conversão.



```
Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####ROTINAS DE CONVERSÃO#####
DEC_BCD:
        MOV     B, #10
        DIV     AB
        MOV     @R0, B
        MOV     B, #10
        DIV     AB
        INC     R0
        MOV     @R0, B
        INC     R0
        MOV     @R0, A
        RET

DEC_ASC:
        MOV     A, @R0
        ADD     A, #$30
        MOV     @R0, A
        INC     R0
        CJNE    R0, #$23, DEC_ASC
        RET
```

Figura 3. 22 - Conversão BCD e ASCII

A figura 3.23 mostra as rotinas para gravar e exibir dados requeridos no display. Conforme dito anteriormente, o display precisa de um determinado tempo para interpretar as instruções e os dados. Estes tempos são tratados de maneiras diferenciadas, de acordo com a natureza das requisições, instruções ou dados.

```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####ROTINAS DE EXIBIÇÃO DE MENSAGEM#####
INICIO_MENS:
        MOV     B, #$00

VOLTA:
        MOV     A, B
        MOVC    A, @A+DPTR
        CJNE    A, #DOLAR, GRAVA_MENS
        RET

GRAVA_MENS:
        MOV     P1, A
        LCALL   TEMPO_DADO
        INC     B
        LJMP    VOLTA

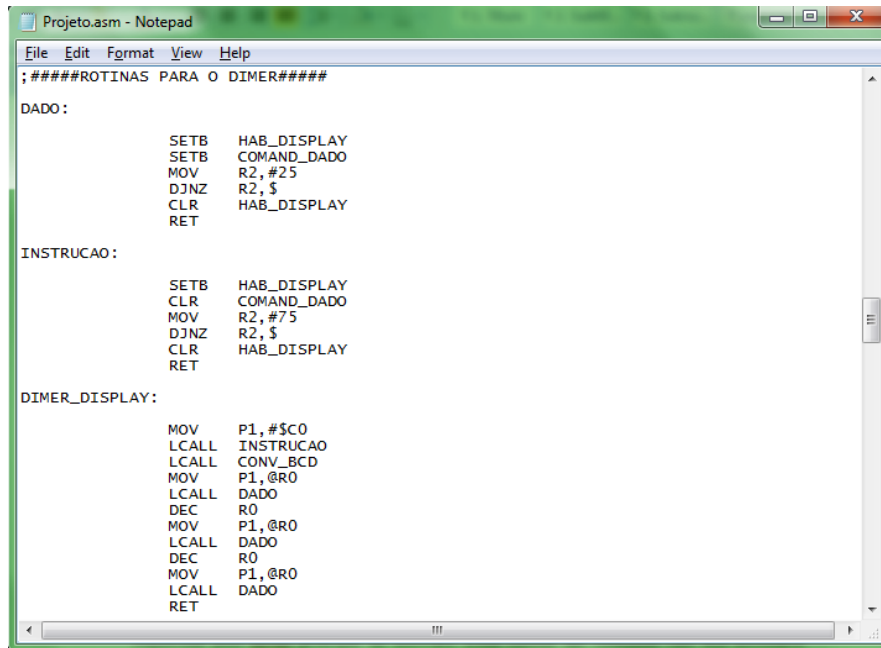
CONV_BCD:
        MOV     A, R6
        MOV     R0, #$20
        LCALL   DEC_BCD
        MOV     R0, #$20
        LCALL   DEC_ASC
        MOV     R0, #$22
        RET

SHOW_DISPLAY:
        MOV     P1, #$C0
        LCALL   TEMPO_INST
        LCALL   CONV_BCD
        MOV     P1, @R0
        LCALL   TEMPO_DADO
        DEC     R0
        MOV     P1, @R0
        LCALL   TEMPO_DADO
        DEC     R0
        MOV     P1, @R0
        LCALL   TEMPO_DADO
        RET

TELA:
        MOV     P1, #$01
        LCALL   TEMPO_INST
        MOV     P1, #$80
        LCALL   TEMPO_INST
        MOV     DPTR, #PER
        LCALL   INICIO_MENS
        LCALL   SHOW_DISPLAY
        RET
  
```

Figura 3. 23 - Rotinas de exibição de mensagens

A figura 3.24 mostra as rotinas de gravação no *display* relacionadas às mensagens de dados e instruções, além da rotina para exibição dos dados inseridos pelo usuário.



```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####ROTINAS PARA O DIMER#####
DADO:
        SETB    HAB_DISPLAY
        SETB    COMAND_DADO
        MOV     R2,#25
        DJNZ    R2,$
        CLR     HAB_DISPLAY
        RET

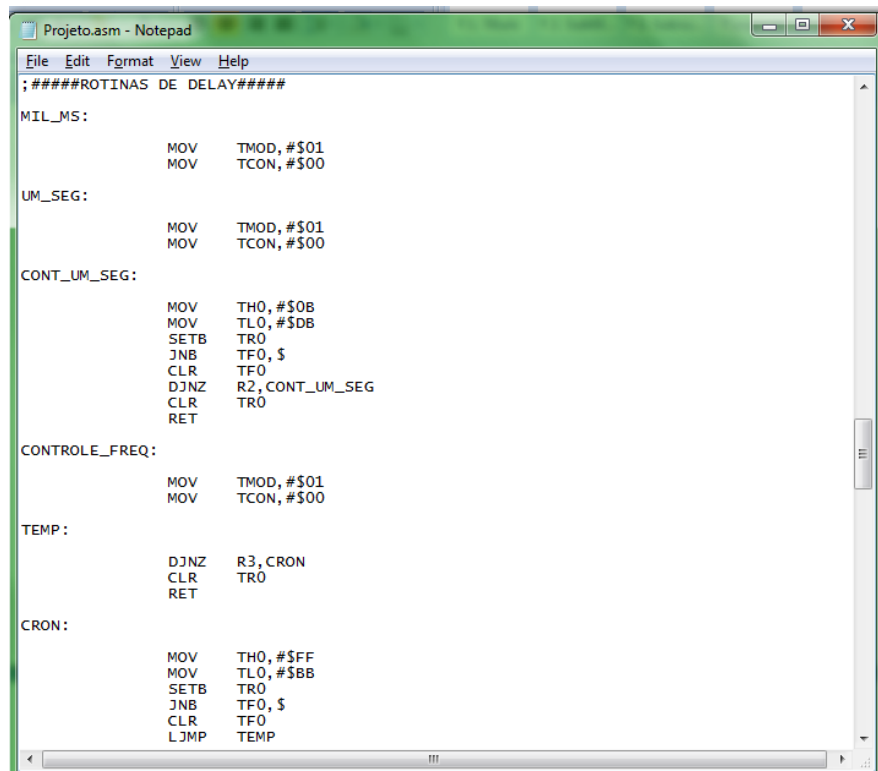
INSTRUCAO:
        SETB    HAB_DISPLAY
        CLR     COMAND_DADO
        MOV     R2,#75
        DJNZ    R2,$
        CLR     HAB_DISPLAY
        RET

DIMER_DISPLAY:
        MOV     P1,$C0
        LCALL   INSTRUCAO
        LCALL   CONV_BCD
        MOV     P1,@R0
        LCALL   DADO
        DEC     R0
        MOV     P1,@R0
        LCALL   DADO
        DEC     R0
        MOV     P1,@R0
        LCALL   DADO
        RET

```

Figura 3. 24 - Rotinas do dimer

A figura 3.25 mostra as rotinas necessárias para gravação de dados e instruções requeridas pelo *kernel* principal do software. Estas rotinas são chamadas caso seja necessário aguardar um determinado tempo para gravar um dado no *display*, por exemplo.



```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####ROTINAS DE DELAY#####
MIL_MS:
        MOV     TMOD,$01
        MOV     TCON,$00

UM_SEG:
        MOV     TMOD,$01
        MOV     TCON,$00

CONT_UM_SEG:
        MOV     TH0,$0B
        MOV     TL0,$DB
        SETB    TR0
        JNB     TF0,$
        CLR     TF0
        DJNZ    R2,CONT_UM_SEG
        CLR     TR0
        RET

CONTROLE_FREQ:
        MOV     TMOD,$01
        MOV     TCON,$00

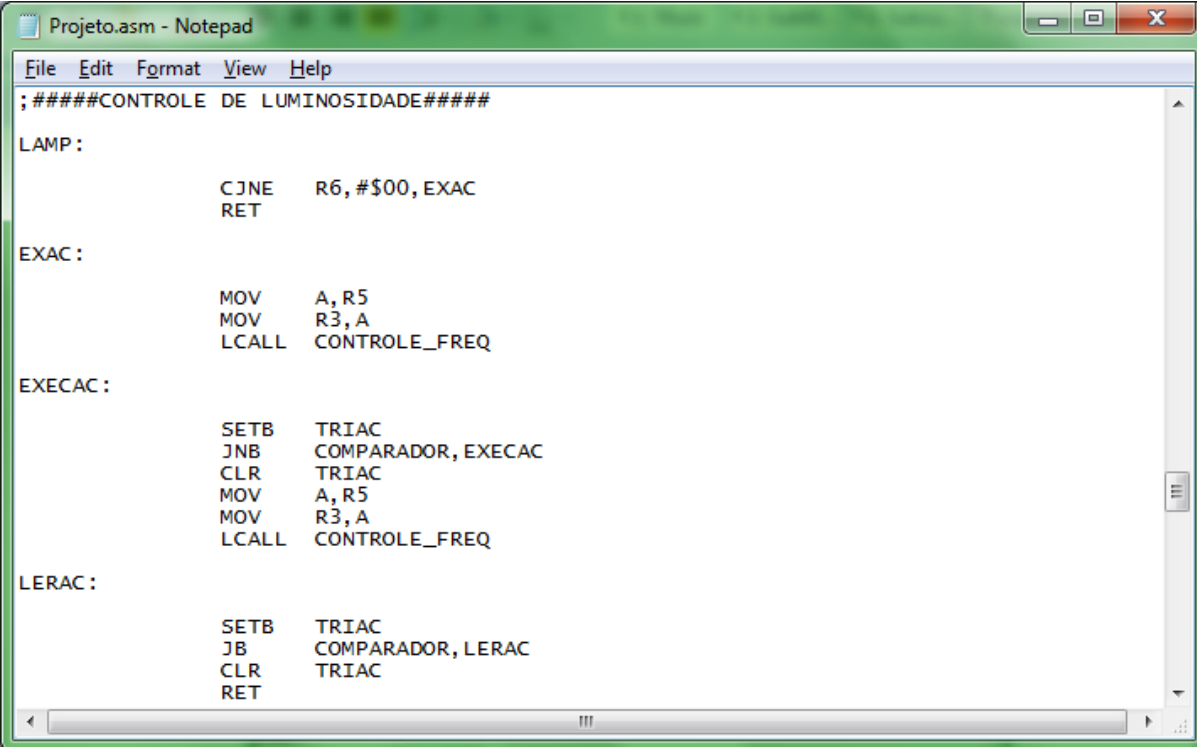
TEMP:
        DJNZ    R3,CRON
        CLR     TR0
        RET

CRON:
        MOV     TH0,$FF
        MOV     TL0,$BB
        SETB    TR0
        JNB     TF0,$
        CLR     TF0
        LJMPL   TEMP

```

Figura 3. 25 - Rotinas de delay

O controle de passagem da tensão pelo zero é mostrado na figura 3.26. Lê-se a porta referente aos sinais enviados pelo comparador analógico ao microcontrolador, interpretando o sinal recebido. A rotina para verificação do zero da senóide é ativada, que é o sincronismo entre o microcontrolador e a tensão da rede que alimentará a carga resistiva. Desta forma, ao primeiro comando do usuário, o TRIAC será disparado via comando do microcontrolador após a passagem pelo zero, iniciando-se assim o incremento ou decremento à medida que o usuário inserir os dados. Basicamente a rotina irá ler a porta do microcontrolador referente ao comparador analógico (3.1) até que um sinal seja percebido nesta porta, ou seja, até encontrar o ponto de mudança de zero para um. É neste ponto que a contagem de disparo do TRIAC terá início. Esta verificação será efetuada em todo meio ciclo da senóide de tensão.



```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;#####CONTROLE DE LUMINOSIDADE#####
LAMP:
        CJNE    R6, #00, EXAC
        RET
EXAC:
        MOV     A, R5
        MOV     R3, A
        LCALL   CONTROLE_FREQ
EXECAC:
        SETB    TRIAC
        JNB     COMPARADOR, EXECAC
        CLR     TRIAC
        MOV     A, R5
        MOV     R3, A
        LCALL   CONTROLE_FREQ
LERAC:
        SETB    TRIAC
        JB      COMPARADOR, LERAC
        CLR     TRIAC
        RET
  
```

Figura 3. 26 - Controle de luminosidade

A figura 3.27 exibe o início do *kernel* principal e a tabela de atribuição de valores, citada anteriormente. Os valores corretos de tensão são aqui referenciados por ponteiros, mostrando corretamente ao usuário a porcentagem requerida e sua devida tensão aplicada à carga resistiva.

```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
;####KERNEL PRINCIPAL#####
INICIO:

    CLR    EA
    LCALL  CONFIG_DISP
    SETB   COMPARADOR
    SETB   BOT_INC
    CLR    TRIAC

    MOV    P1, #80
    LCALL  TEMPO_INST
    MOV    DPTR, #MENS
    LCALL  INICIO_MENS

    MOV    P1, #C0
    LCALL  TEMPO_INST
    MOV    DPTR, #VER
    LCALL  INICIO_MENS
    MOV    R2, #40
    LCALL  UM_SEG
    MOV    R6, #00

    MOV    R1, #25

    MOV    @R1, #88 ;10%
    INC    R1
    MOV    @R1, #79 ;20%
    INC    R1
    MOV    @R1, #71 ;30%
    INC    R1
    MOV    @R1, #64 ;40%
    INC    R1
    MOV    @R1, #58 ;50%
    INC    R1
    MOV    @R1, #51 ;60%
    INC    R1
    MOV    @R1, #44 ;70%
    INC    R1
    MOV    @R1, #37 ;80%
    INC    R1
    MOV    @R1, #28 ;90%
    INC    R1
    MOV    @R1, #01 ;100%

    MOV    R1, #24
    LCALL  TELA
  
```

Figura 3. 27 - Tabela de atribuição de valores

Na figura 3.28 mostra-se a seqüência do *kernel* principal desenvolvido. Aqui algumas outras funções do programa serão requisitadas, como a leitura das portas dos botões de entrada de dados, gravar dados no display, reconhecimento de aumento ou decaimento de tensão e *feedback* ao usuário.

```

Projeto.asm - Notepad
File Edit Format View Help
TES_INC:
    JB     BOT_INC, TES_DEC

    MOV    A, R6
    ADD    A, #10
    MOV    R6, A

    INC    R1
    MOV    A, @R1
    MOV    R5, A

    CJNE   R6, #110, START_DISP
    MOV    R6, #100
    MOV    R5, #01
    MOV    R1, #2E
    LJMP   START_DISP

TES_DEC:
    JB     BOT_DEC, TES_INC

    CLR    C

    MOV    A, R6
    SUBB   A, #10
    MOV    R6, A

    DEC    R1
    MOV    A, @R1
    MOV    R5, A

    CJNE   R6, #246, START_DISP
    MOV    R6, #00
    MOV    R5, #91
    MOV    R1, #24

START_DISP:
    LCALL  DIMER_DISPLAY
    MOV    R2, #08

DEBAUSS:
    LCALL  LAMP
    DJNZ   R2, DEBAUSS

EXECUTA:
    LCALL  LAMP
    JNB    BOT_INC, TES_DEC
    JNB    BOT_DEC, TES_INC
    LJMP   EXECUTA
END
  
```

Figura 3. 28 - Kernel principal

Para gravar o firmware no microcontrolador, primeiramente deve-se compilá-lo. Para tanto, usa-se um programa específico da gravadora, o AVMAC51, que cria, a partir do arquivo *.ASM onde o programa está gravado, um arquivo *.BIN para gravação no microcontrolador. A figura 3.29 mostra a tela do programa compilado.

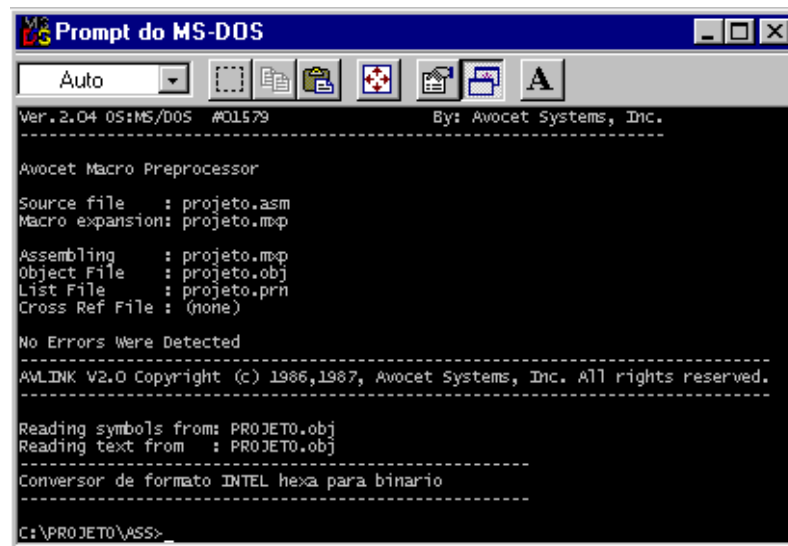


Figura 3. 29 - Programa compilado

Após compilado, o arquivo *.BIN é gerado. Dentro do programa da gravadora, este arquivo deve ser colocado em *buffer* para então ser inserido no microcontrolador. A figura 3.30 mostra o programa e o arquivo “projeto.bin” sendo gravado em *buffer*.



Figura 3. 30 - Arquivo gravado em *buffer*

Agora o software está pronto para ser escrito no microcontrolador. Deve-se primeiro apagar os dados do microcontrolador para então iniciar a gravação. Após este procedimento, o firmware do microcontrolador está nele gravado, conforme mostra a figura 3.31.



Figura 3. 31 - Tela de gravação do microcontrolador

3.5 Testes

Neste tópico trataremos dos testes realizados com o projeto. Com o circuito elaborado e o programa desenvolvido, alguns testes foram realizados a fim de verificar a eficiência do circuito. A figura 3.32 mostra o projeto por completo, ainda desligado.

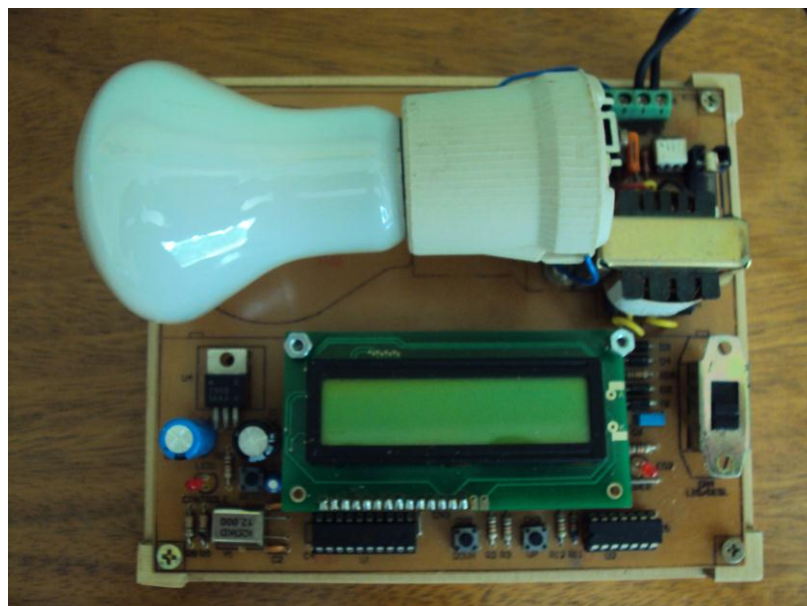


Figura 3. 32 - Circuito desligado

Ao se ligar o circuito em uma rede de alimentação de 220 volts e ao se acionar a chave do circuito, a lâmpada se mantém apagada, enquanto uma mensagem de apresentação é exibida no display, conforme ilustra a figura 3.33. Isto mostra que, mesmo com a alimentação ligada, o TRIAC não chaveia a tensão e não há disparos por meio de seu gatilho.

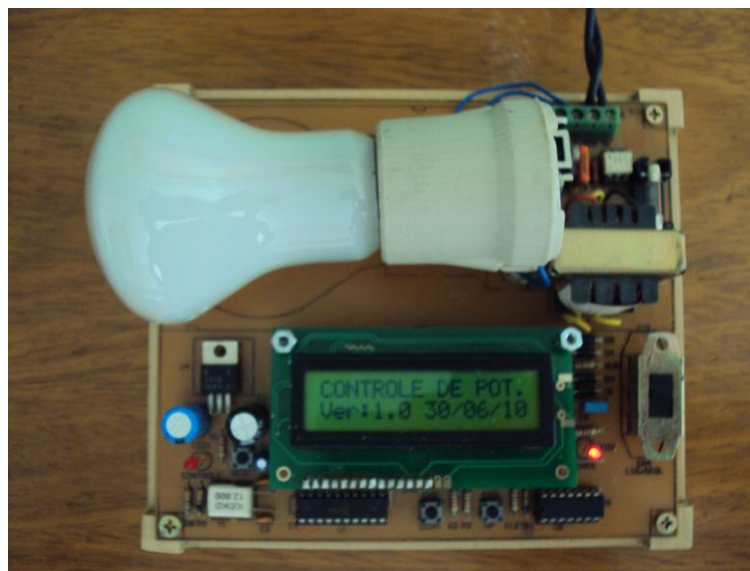


Figura 3. 33 - Mensagem de apresentação

Após a exibição da mensagem de apresentação o programa mostra no *display* uma mensagem de porcentagem de potência aplicada à carga, como *feedback* para o usuário. De acordo com o incremento ou decremento exibido no display, a rotina de programação mudará o ponto de disparo no TRIAC sobre a onda de tensão CA. Na figura 3.34 é exibida a mensagem de *feedback* para o usuário.

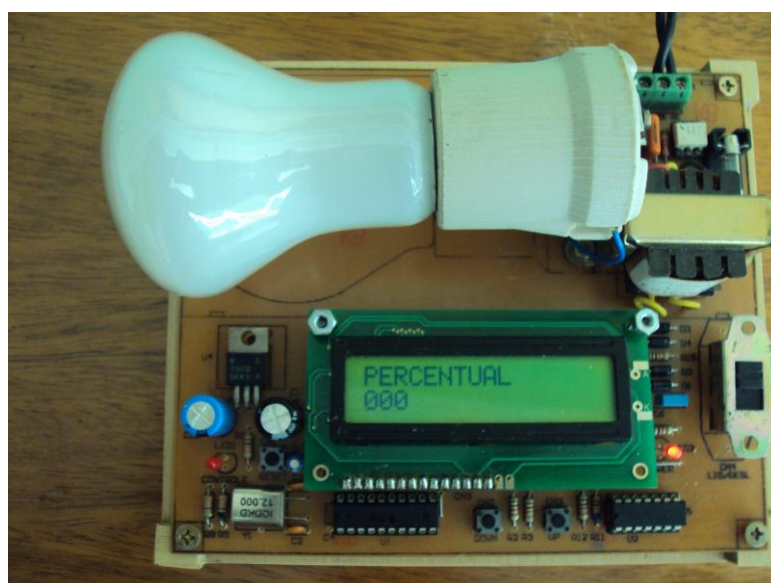


Figura 3. 34 - Mensagem de feedback

Na figura 3.35 exemplifica-se o incremento da tensão na lâmpada. Neste caso temos 100% de potência aplicada à lâmpada, que corresponde a 227 volts.

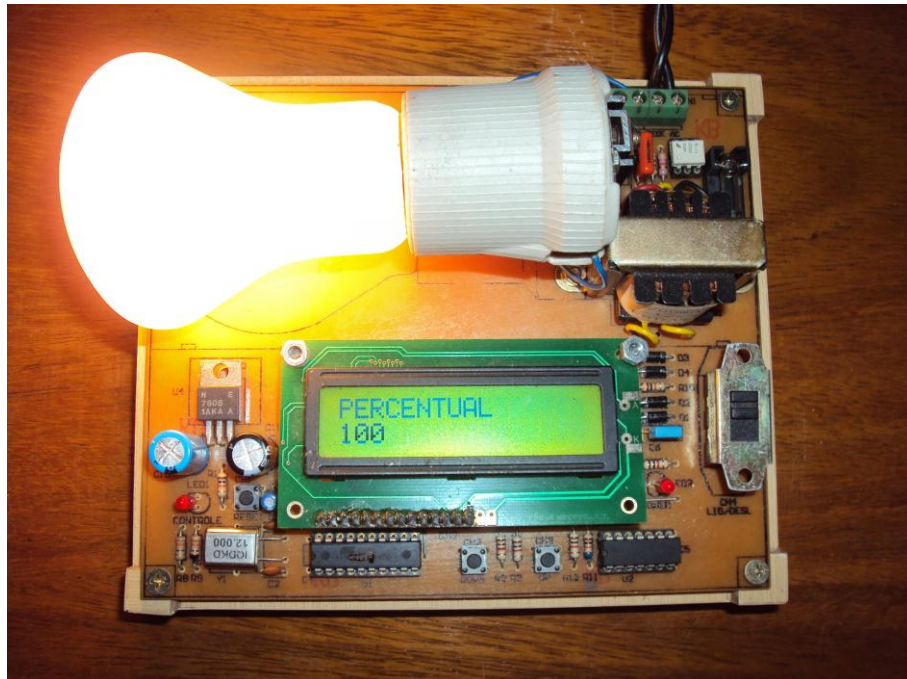


Figura 3. 35 - Potência aplicada de 100%

Medindo-se a tensão nos terminais da lâmpada, espera-se que a senóide de tensão tenha um comportamento parecido com o mostrado na figura 2.3. A figura 3.36 mostra a senóide de tensão chaveada pelo TRIAC para um percentual exibido no display igual a 10%.

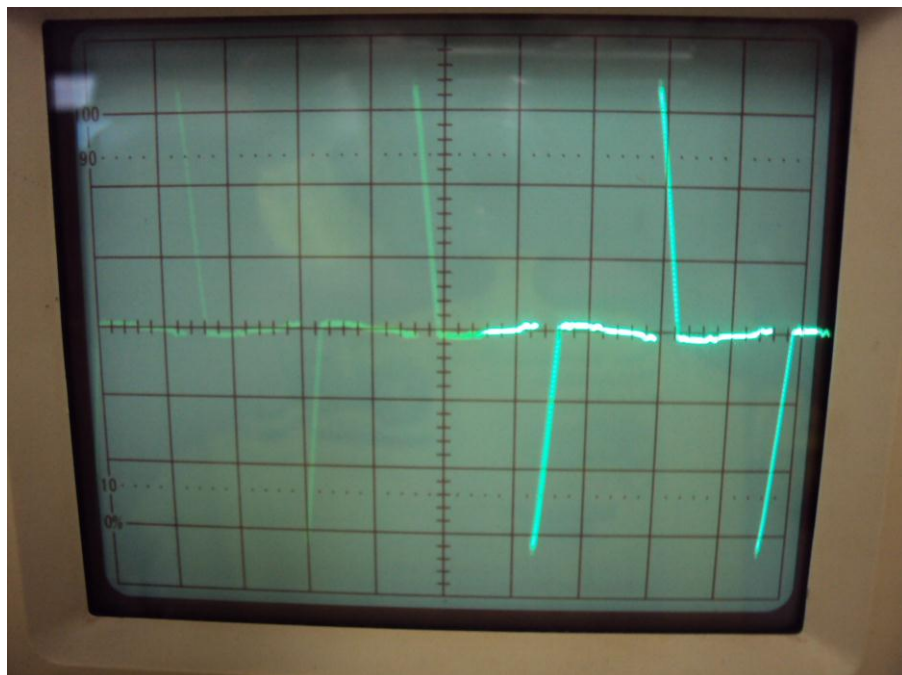


Figura 3. 36 - Senóide chaveada em 10%

Da mesma forma, para um valor exibido no display de 30%, temos a senóide exibida na figura 3.37.

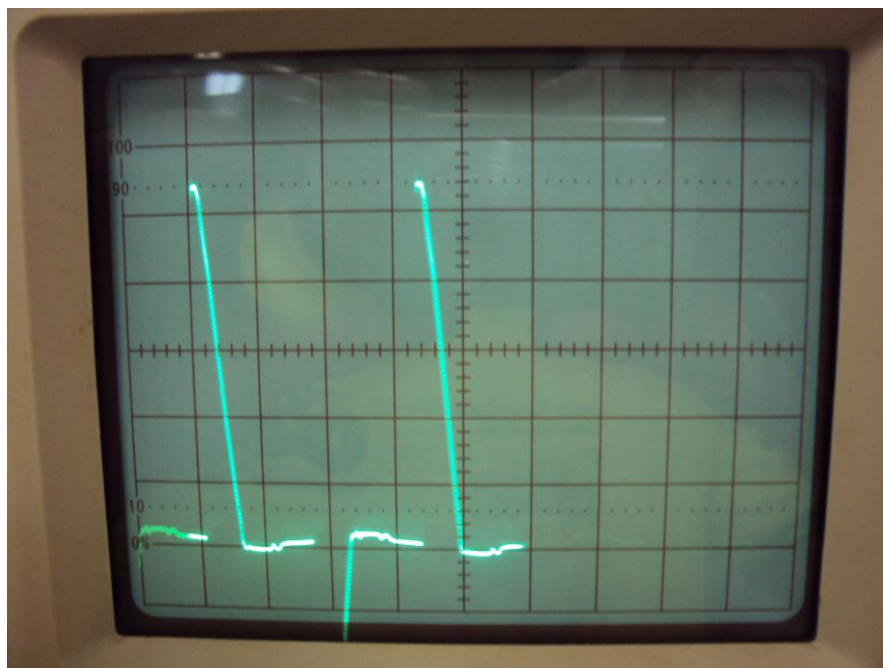


Figura 3. 37 - Senóide chaveada em 30%

A figura 3.38 mostra o formato de onda para uma exibição no display de 50%. O parâmetro vertical foi deslocado para baixo no osciloscópio para que o pico da onda fosse visível.

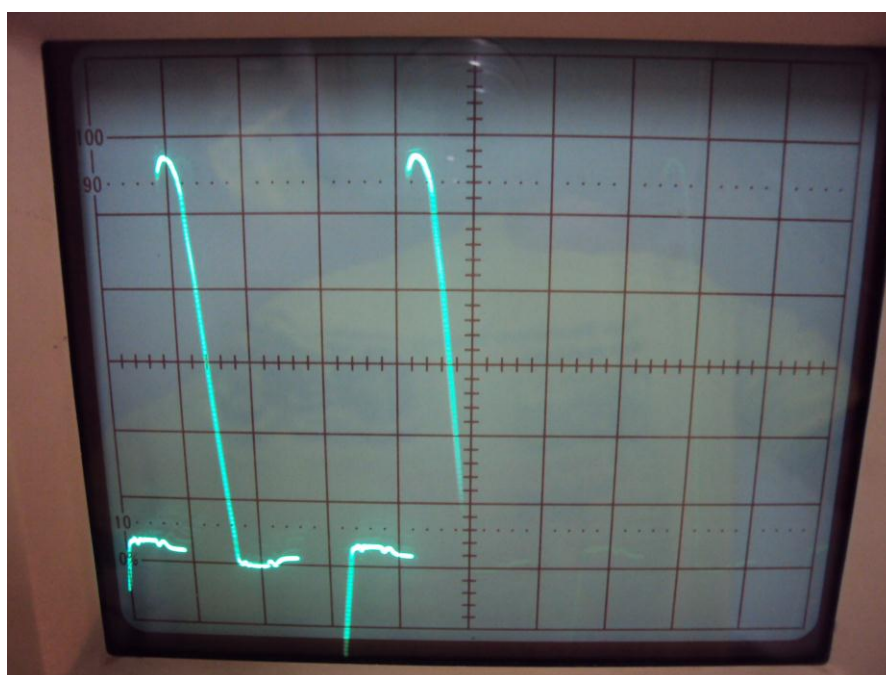


Figura 3. 38 - Senóide chaveada em 50%

Também a figura 3.39 exibe um formato de onda chaveado pelo TRIAC, porém para um valor no display de 70%.

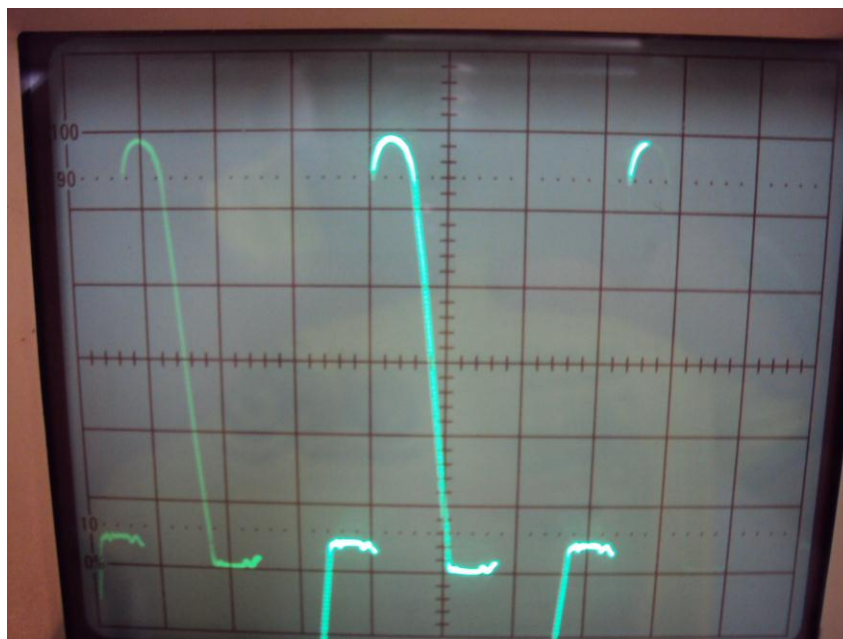


Figura 3. 39 - Senóide chaveada em 70%

Finalmente, tem-se o chaveamento de 100% da tensão pelo TRIAC, mostrada na figura 3.40. Nota-se que a tensão não é completa, visto que o TRIAC precisa de uma corrente mínima para que possa conduzir corrente, além dos tempos de execução das rotinas de programação. Devido à amplitude da senóide e a limitação do osciloscópio (400 volts de entrada), não se pode visualizar a senóide completa, quando o display mostra 100%.

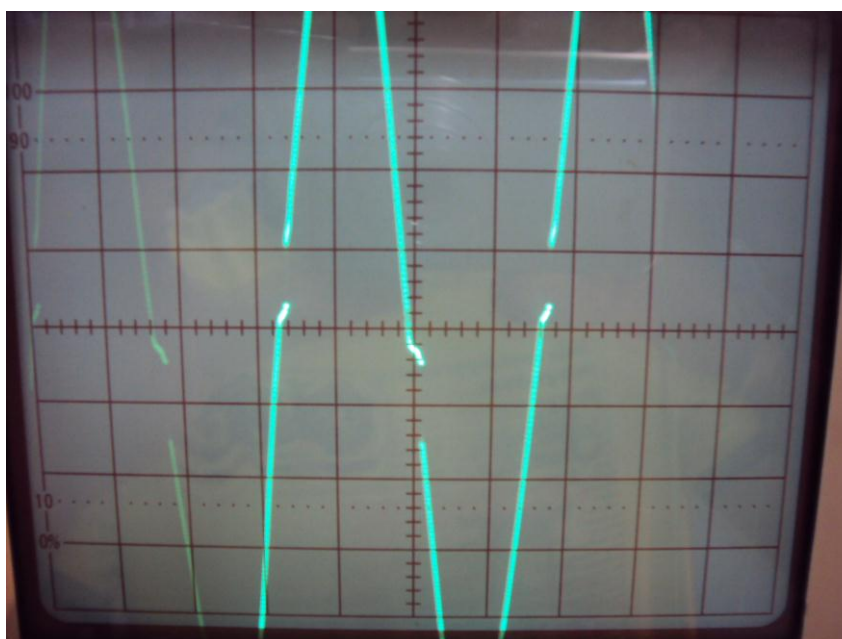


Figura 3. 40 - Senóide chaveada em 100%

No segmento regulador de tensão, a senóide de 12 volts medida é mostrada na figura 3.41. A senóide vista é um sinal capturado antes de ser retificado e amortecido pelos diodos em ponte.

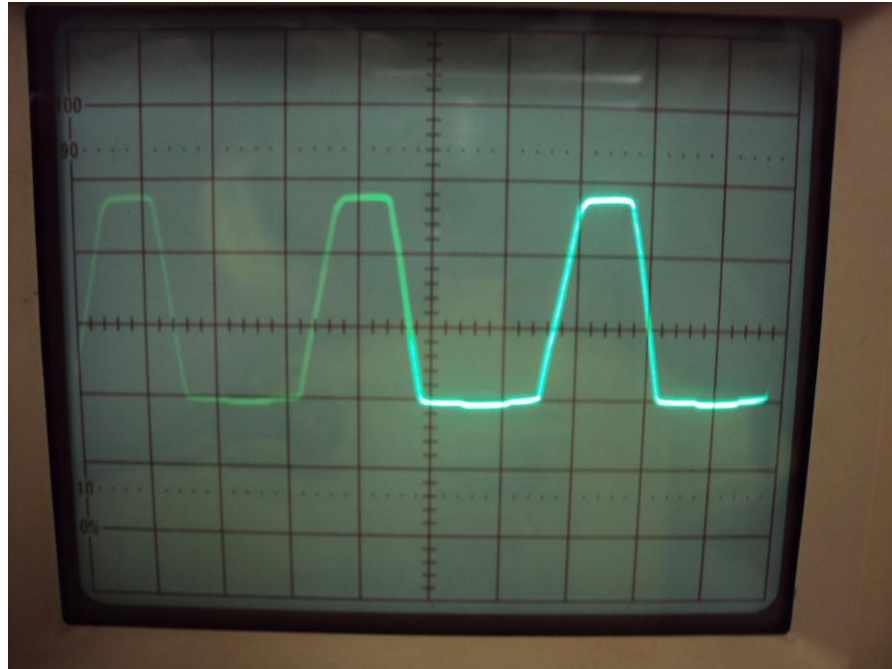


Figura 3. 41 - Saída do transformador

Os pulsos do TRIAC também podem ser visualizados. A figura 3.42 mostra os pulsos para um valor mostrado no display de 10%.

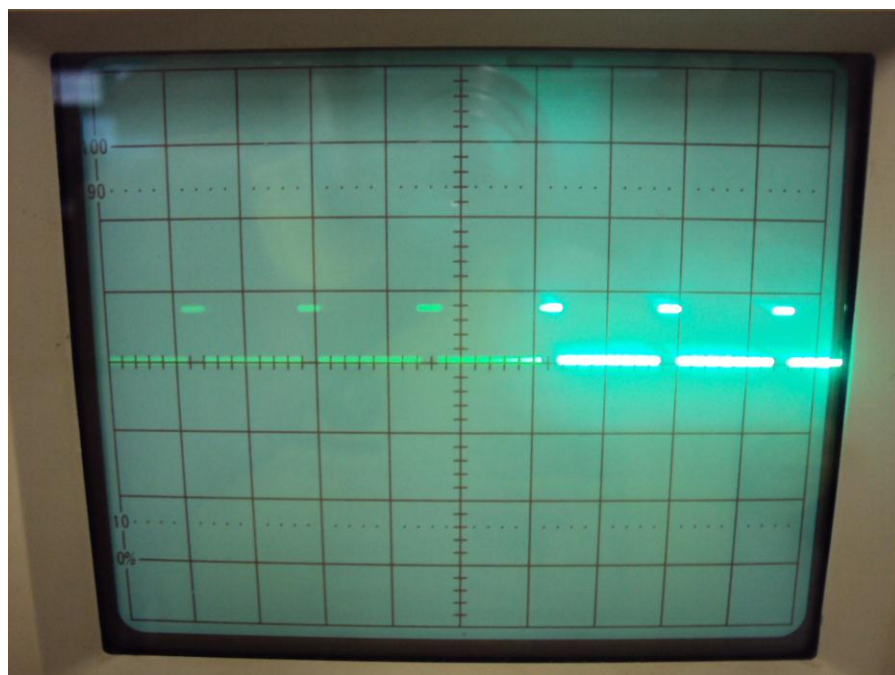


Figura 3. 42 - Pulsos TRIAC para 10%

A figura 3.43 mostra os pulsos para um valor exibido no display de 30%.

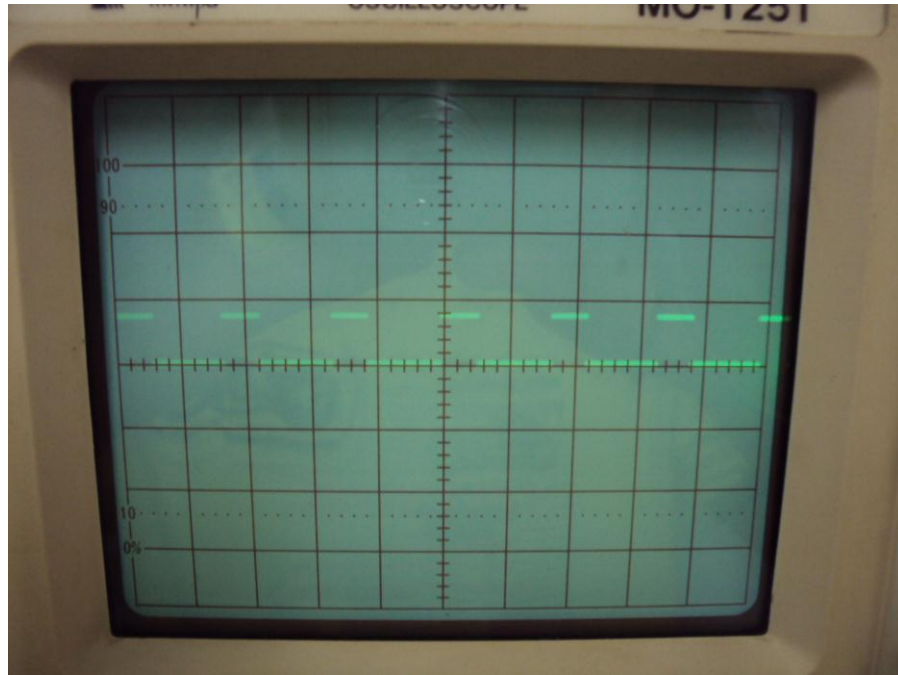


Figura 3. 43 - Pulsos TRIAC para 30%

Para pulsos chaveando 50% da onda, tem-se o formato de onda mostrado na figura 3.44.

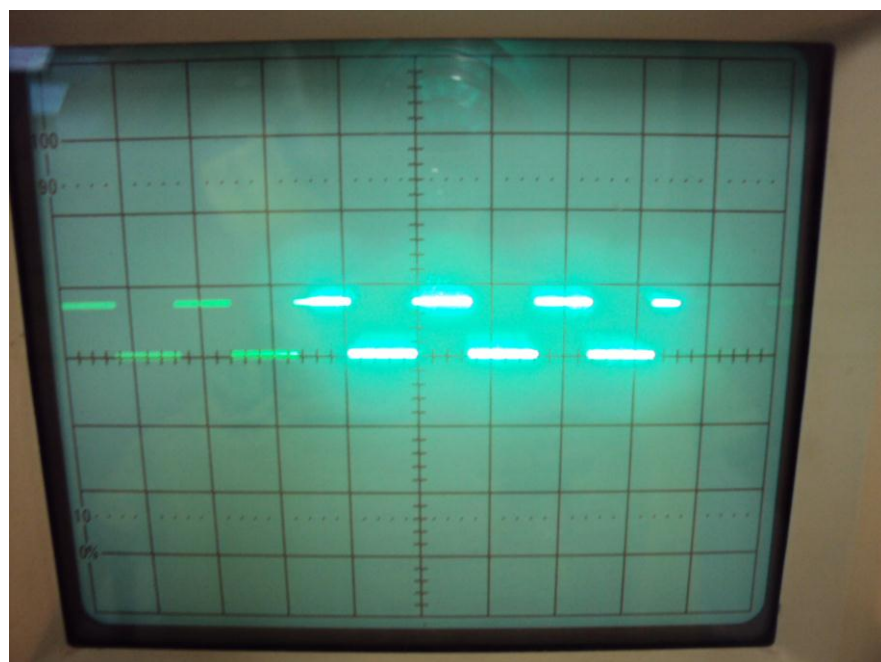


Figura 3. 44 - Pulsos TRIAC para 50%

Para valores de exibição de 70%, os pulsos do TRIAC são percebidos na figura 3.45.

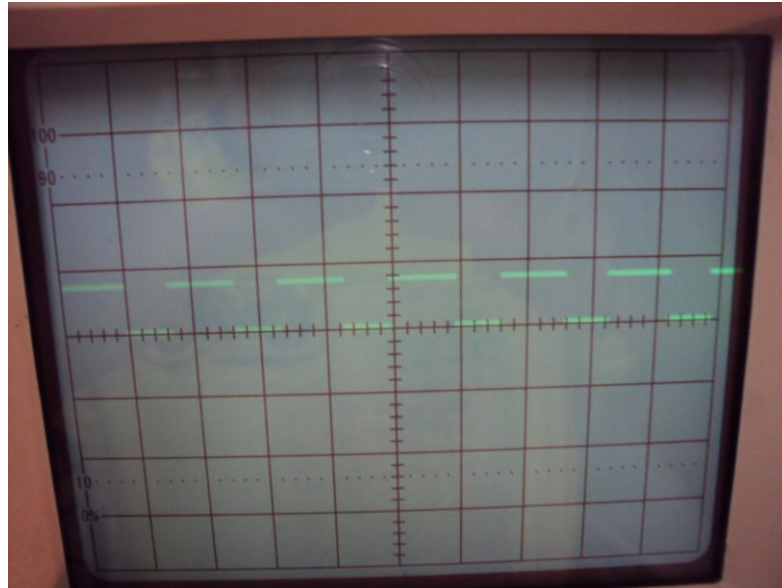


Figura 3. 45 - Pulsos TRIAC para 70%

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO

Este projeto visa o controle da potência aplicada a uma carga por meio da utilização de um microcontrolador da família 8051 e um dispositivo de chaveamento, TRIAC. Por princípio, este circuito deve atender a uma carga resistiva que seja acoplada ao circuito. Por meio do controle do tempo de disparo do TRIAC em relação ao período da senóide de tensão, podemos aplicar uma determinada potência à carga em questão.

A proposta inicial de se controlar a potência aplicada a uma carga resistiva foi alcançada com êxito. De acordo com a tensão eficaz aplicada na carga resistiva, os valores de potência aplicada podem ser calculados.

Para se chegar a este método de controle, diversas dificuldades foram encontradas. A primeira delas seria mensurar o circuito, encontrando os componentes ideais para seu funcionamento e proteção de seus dispositivos. Com alguma consulta a circuitos desenvolvidos para fins parecidos, esta dificuldade foi superada.

Outro problema foi resultado do uso de *displays* de cátodo na saída de dados para o usuário. Por serem visíveis por multiplexação, os LEDs do *display* consumiam um tempo demasiadamente grande para que pudessem ser visíveis a olho nu, o que acabou levando ao uso de *display* de cristal líquido.

A contabilização dos tempos de execução das rotinas de programação foi a maior dificuldade. Isto levou ao uso de tabelas de referenciamento no software de acordo com valores empíricos medidos, retornando os valores inseridos pelo usuário e os respectivos valores de tensão eficaz aplicados à carga resistiva.

Também é importante citar que o uso de um comparador analógico externo ao microcontrolador se deu pelo fato de que os resultados obtidos com o comparador interno à este dispositivo não foram satisfatórios. O sinal de saída estava com os semi-ciclos desproporcionais. Ao se utilizar um comparador analógico externo, o sinal medido ficou satisfatório.

O desenvolvimento da própria rotina de programação foi um desafio à parte, já que seu desenvolvimento exige conhecimentos profundos tanto do software quando do hardware do que se quer controlar.

O circuito desenvolvido se mostrou confiável, tendo o controle de potência uma margem de erro aceitável.

Em projetos futuros, existe a possibilidade de se estender a utilização do circuito para aplicações realmente práticas, como o controle do aquecimento da água de um chuveiro elétrico, ou o controle de potência sobre o torque de um motor, ou até mesmo aplicado a sistemas de iluminação completos, considerando-se as diferenças existentes em um circuito puramente resistivo e um circuito indutivo.

O software desenvolvido pode ainda ser otimizado, refinando-se o range de feedback de 10% para 1%, alcançando assim uma maior precisão de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]- ALEXANDER, Charles K. Fundamentos de Circuitos Elétricos. São Paulo: McGraw-Hill, 2000.
- [2]- COMER, David. Projeto de Circuitos Eletrônicos. São Paulo: John Wiley & Sons. Rio de Janeiro: LTC. LTC, 2003.
- [3]- MALVINO, Albert. Eletrônica. Volume 2. 7º Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- [4]- NICOLSI, Denys E. C. Microcontrolador 8051 Detalhado. 5ªed. São Paulo: editora Érica, 2004.
- [5]- SHIMIZU, Tamio. Linguagem Assembly: Programação em Microprocessadores. São Paulo: Editora Atlas, 1993.
- [6]- NICOLSI, Denys E. C. Laboratório de Microcontroladores Família 8051. 7º ed. São Paulo: Editora Érica, 2002.
- [7]- JÚNIOR, Vidal Pereira da Silva. Aplicações práticas do Microcontrolador 8051. 7º ed. São Paulo: Editora Érika, 1998.
- [8]- AHMED, Ashfaq. Eletrônica de Potência. São Paulo: Pearson Education, 2000.
- [9]- ALMEIDA, José Luíz Antunes de. Dispositivos semicondutores: Tiristores. 11º ed. São Paulo: Editora Érica, 2007.

[10]- MELLO, Hilton.A. Dispositivos semicondutores. 3º ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

[11]- PORST, Alfred. Semicondutores.13º ed. São Paulo: Edgard Blücher, Siemens A.G, 1976.

APÊNDICE I – CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE DE CONTROLE RANGE 10%

```

$SUBTITLE(CONTROLE.ASM)
$PG PL=80
$PG PAGEWIDTH=120
$ALLPUBLIC
$PAGINATE

```

```

DEFSEG ABSSEGNAME, ABSOLUTE
SEG ABSSEGNAME

```

```

;#####
#####
;CIRCUITO PARA CONTROLE DE POTENCIA UTILIZANDO TIRISTOR TRIAC E
MICROCONTROLADOR 8051
;CENTRO UNIVERSITARIO DE BRASILIA
;ENGENHARIA DA COMPUTACAO
;FERNANDO DE MELO MACIEL - 20317542
;2 SEMESTRE DE 2010
;#####
#####

```

```

TRIAC EQU P3.0
COMPARADOR EQU P3.1
BOT_DEC EQU P3.2
BOT_INC EQU P3.3
COMAND_DADO EQU P3.4
HAB_DISPLAY EQU P3.5
DOLAR EQU '$'

```

```

ORG 0000H
LJMP INICIO

```

```

MENS DB 'CONTROLE DE POT.$'
VER DB 'Ver:1.0 03/12/10$'
PER DB 'PERCENTUAL $'

```

```

;#####ROTINAS DE CONFIGURACAO DO DISPLAY#####

```

```

TEMPO_DADO:

```

```

SETB HAB_DISPLAY
SETB COMAND_DADO
MOV R2,#1
LCALL MIL_MS
CLR HAB_DISPLAY
RET

```

```

TEMPO_INST:

```

```

SETB  HAB_DISPLAY
CLR   COMAND_DADO
MOV   R2,#3
LCALL MIL_MS
CLR   HAB_DISPLAY
RET

```

CONFIG_DISP:

```

MOV   P1,$38
LCALL TEMPO_INST
MOV   P1,$0C
LCALL TEMPO_INST
MOV   P1,$06
LCALL TEMPO_INST
MOV   P1,$01
LCALL TEMPO_INST
RET

```

;#####ROTINAS DE CONVERSÃO#####

DEC_BCD:

```

MOV   B,#10
DIV   AB
MOV   @R0,B
MOV   B,#10
DIV   AB
INC   R0
MOV   @R0,B
INC   R0
MOV   @R0,A
RET

```

DEC_ASC:

```

MOV   A,@R0
ADD   A,$30
MOV   @R0,A
INC   R0
CJNE  R0,$23,DEC_ASC
RET

```

;#####ROTINAS DE EXIBIÇÃO DE MENSAGEM#####

INICIO_MENS:

```
MOV B,#$00
```

VOLTA:

```
MOV A,B
MOVC A,@A+DPTR
CJNE A,#DOLAR,GRAVA_MENS
RET
```

GRAVA_MENS:

```
MOV P1,A
LCALL TEMPO_DADO
INC B
LJMP VOLTA
```

CONV_BCD:

```
MOV A,R6
MOV R0,#$20
LCALL DEC_BCD
MOV R0,#$20
LCALL DEC_ASC
MOV R0,#$22
RET
```

SHOW_DISPLAY:

```
MOV P1,$C0
LCALL TEMPO_INST
LCALL CONV_BCD
MOV P1,@R0
LCALL TEMPO_DADO
DEC R0
MOV P1,@R0
LCALL TEMPO_DADO
DEC R0
MOV P1,@R0
LCALL TEMPO_DADO
RET
```

TELA:

```
MOV P1,$01
LCALL TEMPO_INST
MOV P1,$80
LCALL TEMPO_INST
MOV DPTR,#PER
LCALL INICIO_MENS
LCALL SHOW_DISPLAY
```

RET

;#####ROTINAS PARA O DIMER#####

DADO:

```
SETB HAB_DISPLAY
SETB COMAND_DADO
MOV  R2,#25
DJNZ R2,$
CLR  HAB_DISPLAY
RET
```

INSTRUCAO:

```
SETB HAB_DISPLAY
CLR  COMAND_DADO
MOV  R2,#75
DJNZ R2,$
CLR  HAB_DISPLAY
RET
```

DIMER_DISPLAY:

```
MOV  P1,$C0
LCALL INSTRUCAO
LCALL CONV_BCD
MOV  P1,@R0
LCALL DADO
DEC  R0
MOV  P1,@R0
LCALL DADO
DEC  R0
MOV  P1,@R0
LCALL DADO
RET
```

;#####ROTINAS DE DELAY#####

MIL_MS:

```
MOV  TMOD,$01
MOV  TCON,$00
```

UM_SEG:

```
MOV  TMOD,$01
MOV  TCON,$00
```

CONT_UM_SEG:

```

MOV  TH0,#$0B
MOV  TL0,#$DB
SETB TR0
JNB  TF0,$
CLR  TF0
DJNZ R2,CONT_UM_SEG
CLR  TR0
RET

```

CONTROLE_FREQ:

```

MOV  TMOD,#$01
MOV  TCON,#$00

```

TEMP:

```

DJNZ R3,CRON
CLR  TR0
RET

```

CRON:

```

MOV  TH0,$FF
MOV  TL0,$BB
SETB TR0
JNB  TF0,$
CLR  TF0
LJMP TEMP

```

;#####CONTROLE DE LUMINOSIDADE#####

LAMP:

```

CJNE R6,$$00,EXAC
RET

```

EXAC:

```

MOV  A,R5
MOV  R3,A
LCALL CONTROLE_FREQ

```

EXECAC:

```

SETB TRIAC
JNB  COMPARADOR,EXECAC
CLR  TRIAC

```

```

MOV  A,R5
MOV  R3,A
LCALL CONTROLE_FREQ

```

LERAC:

```

SETB TRIAC
JB   COMPARADOR,LERAC
CLR  TRIAC
RET

```

;#####KERNEL PRINCIPAL#####

INICIO:

```

CLR  EA
LCALL CONFIG_DISP
SETB COMPARADOR
SETB BOT_INC
CLR  TRIAC

```

```

MOV  P1,#$80
LCALL TEMPO_INST
MOV  DPTR,#MENS
LCALL INICIO_MENS

```

```

MOV  P1,#$C0
LCALL TEMPO_INST
MOV  DPTR,#VER
LCALL INICIO_MENS
MOV  R2,#$40
LCALL UM_SEG
MOV  R6,#00

```

```

MOV  R1,$25

```

```

MOV  @R1,#88      ;10%
INC  R1
MOV  @R1,#79      ;20%
INC  R1
MOV  @R1,#71      ;30%
INC  R1
MOV  @R1,#64      ;40%
INC  R1
MOV  @R1,#58      ;50%
INC  R1
MOV  @R1,#51      ;60%
INC  R1
MOV  @R1,#44      ;70%
INC  R1

```

```

MOV  @R1,#37 ;80%
INC  R1
MOV  @R1,#28 ;90%
INC  R1
MOV  @R1,#01 ;100%

```

```

MOV  R1,#$24

```

```

LCALL TELA

```

```

TES_INC:

```

```

JB  BOT_INC,TES_DEC

```

```

MOV  A,R6
ADD  A,#10
MOV  R6,A

```

```

INC  R1
MOV  A,@R1
MOV  R5,A

```

```

CJNE R6,#110,START_DISP
MOV  R6,#100
MOV  R5,#01
MOV  R1,#$2E

```

```

LJMP START_DISP

```

```

TES_DEC:

```

```

JB  BOT_DEC,TES_INC

```

```

CLR  C

```

```

MOV  A,R6
SUBB A,#10
MOV  R6,A

```

```

DEC  R1
MOV  A,@R1
MOV  R5,A

```

```

CJNE R6,#246,START_DISP
MOV  R6,#00
MOV  R5,#91
MOV  R1,#$24

```

```

START_DISP:

```

```

LCALL DIMER_DISPLAY

```

```

MOV  R2,#08

```

DEBAUSS:

```
    LCALL LAMP  
    DJNZ  R2,DEBAUSS
```

EXECUTA:

```
    LCALL LAMP  
    JNB  BOT_INC,TES_DEC  
    JNB  BOT_DEC,TES_INC  
    LJMP EXECUTA  
    END
```